



Universidade de Aveiro

Departamento de Engenharia Civil (Decivil)

Ano 2020

**Daniela Alexandra
Ferreira Bernardes**

**Desenvolvimento de Argamassas para uma
Economia Circular**



**Daniela Alexandra
Ferreira Bernardes**

**Desenvolvimento de Argamassas para uma
Economia Circular**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizado sob a orientação científica do Professor Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação da Doutora Helena Maria da Costa Paiva, Investigadora doutorada (Nível 1) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

**Dedico este trabalho ao meu avô Ramiro por ter sido a pessoa incrível e inspiradora que
alguma vez conheci.**

o júri

Presidente

Prof. Doutora Maria Fernanda da Silva
Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

Arguente

Doutor Ana Fragata da Costa
Investigadora Doutorada (nível 1) da Universidade de Aveiro

Co-Orientadora

Doutora Helena Maria da Costa Paiva
Investigadora Doutorada (nível 1) da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

As primeiras palavras de agradecimento vão para os supervisores e orientadores desta tese, Professor Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira (orientador) e à Doutora Helena Maria da Costa Paiva (co-orientadora), que propuseram o presente trabalho. Deles recebi amizade, sugestões e disponibilidade, que tornaram menos árida e mais aliciante a sua elaboração.

Quero agradecer à engenheira Maria Carlos e ao técnico Vítor Rodrigues, por toda a ajuda, disponibilidade, ensinamentos e conhecimentos transmitidos, e também pela boa disposição. Vou sentir muitas saudades.

Quero agradecer ao Doutor Luís Silva, ao Eng.º Pedro Sequeira e ao Eng.º Eduardo Costa da WEBER SAINT-GOBAIN pela colaboração e disponibilidade para me fornecer alguns materiais e pelas indicações e informações que foram importantes para o desenvolvimento deste trabalho. Aproveito também a oportunidade para agradecer à HARSCO e à MEGASA (SN Seixal e SN Maia) nas pessoas das Eng^a Sofia Silva e Eng^a Alexandra Canelas pela cedência do resíduo ASIC e do resíduo refratário, respetivamente.

Quero também dirigir uma palavra de apreço aos meus familiares. Aos meus pais, Gustavo e Paula, faltam-me as palavras que expressem o meu profundo agradecimento. Um obrigado do fundo do coração por me incentivarem, acreditarem em mim e por tudo o que fizeram e continuaram a fazer.

À minha avó Manuela por me incentivar a nunca desistir dos meus sonhos.

À minha irmã Tânia por ser minha fiel confidente e minha companheira de dias e noites de pesquisa e trabalho e por ser a pessoa que eu necessito para me abstrair um pouco do trabalho.

Ao meu namorado Rui por ser meu amigo e por me ajudar a concretizar o meu trabalho, apoiando-me mesmo sabendo por vezes das minhas ausências devido ao trabalho e ao cansaço.

Aos amigos mais próximos que, durante este trabalho, souberam compreender as minhas prolongadas ausências e os meus horários pouco ortodoxos.

A todos um sincero
MUITO OBRIGADO!

Palavras-chave: Economia Circular, Argamassas, Betonilhas, Resíduos, ASIC

Resumo: Ao longo dos últimos anos tem-se vindo a verificar uma mudança na sociedade, relativamente a questões do foro ambiental, social e económico. Cada vez mais, a sociedade tem vindo a deparar-se com a questão de “E porque não utilizar alguns resíduos na substituição parcial e/ou total de alguns recursos naturais devido à sua escassez?” Com este pragmatismo imposto, surge então a necessidade de pensar em adquirir conhecimentos, análises e resultados do estudo dessa substituição e/ou incorporação de resíduos em materiais de construção como argamassas de reboco e betonilhas para pisos radiantes.

O trabalho incidiu sobre o estudo dos materiais e agregados, nomeadamente, a substituição parcial da areia no caso das argamassas de reboco pelos resíduos em estudo, e na incorporação dos resíduos em estudo nas betonilhas fornecidas pela empresa Saint-Gobain Portugal. Na análise aos resíduos, avaliaram-se propriedades e características como a distribuição granulométrica, a massa volúmica, a área superficial específica, entre outras. Na análise destes produtos em pasta avaliou-se a trabalhabilidade pelo método do espalhamento. Na análise dos produtos endurecidos determinaram-se, ao fim de cura a 28 e 90 dias, propriedades físicas tais como a massa volúmica, o módulo de elasticidade e a condutibilidade térmica. Também foram determinadas as propriedades mecânicas como a resistência à flexão e a resistência à compressão.

Por fim, foi avaliada a viabilidade das soluções encontradas, tendo também em consideração o coeficiente de capilaridade e a verificação do desenvolvimento de eflorescências nos produtos.

A introdução dos resíduos em estudo, nomeadamente o ASIC, permitiu alcançar com sucesso os objetivos pretendidos, nomeadamente, estudar e desenvolver argamassas que possuam na sua composição resíduos como alternativa a matérias primas naturais numa perspetiva de contribuir para o modelo de economia circular, sendo possível se substituir a areia nas argamassas de revestimento e nas betonilhas para pisos radiantes. Com este estudo, obteve-se em algumas amostras o mesmo desempenho equivalente ao modelo convencional, e noutras uma melhoria.

Keywords: Circular Economy, Mortars, Screeds, Wastes, ASIC

Abstract: Over the past few years there has been a change in society in relation to environmental, social and economic issues. Increasingly, society has been faced with the question of “And why not use some waste in the partial and/or total replacement of some natural resources due to their scarcity?”. With this imposed pragmatism, then arises the need to think about acquiring knowledge, analyses and results of the study of this substitution and/or incorporation of waste in plaster mortars and screeds for radiant floors.

The work focused on the study of materials and aggregates, namely the partial replacement of sand in the case of plaster mortars by the waste under study, and the incorporation of the waste under study in the screeds supplied by Saint-Gobain Portugal. In the analysis of the wastes, some physical properties were evaluated, such as the particle size distribution, density, specific surface area among others. In the analysis of fresh products, slump was used to evaluate mortars and screeds workability. In the analysis of hardened state products, with curing ages of 28 and 90 days, physical properties such as density, elastic modulus and thermal conductivity were determined. Mechanical properties such as flexural strength and compressive strength were also measured.

Finally, the viability of the solutions found was evaluated, taking also into account the capillarity coefficient and the development of efflorescences in the products.

One of the wastes under study, namely ASIC, was successfully incorporated and achieved the desired objectives, namely to study and develop mortars that have in their composition waste as an alternative to natural raw materials in order to contribute to the circular economy model, by replacing the aggregates (sand) in the coating mortars and could also be a possible waste to be incorporated into the screeds for radiant floors.

With this study, the same performance equivalent to the conventional model was obtained in samples, and in others an improvement.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Organização da dissertação	3
2	Argamassas, Sustentabilidade e Economia Circular	5
2.1	Conceitos de Sustentabilidade na Construção	5
2.2	Conceitos de Economia Circular	9
2.3	Argamassas na Construção	14
2.3.1	Tipos de argamassas e sua aplicação.....	14
2.3.2	Recursos Materiais Naturais usados em Argamassas	20
2.3.2.1	Ligantes.....	20
2.3.2.2	Agregados	21
2.3.2.3	Água da amassadura	21
2.3.2.4	Adições: adjuvantes e aditivos	22
2.4	A valorização de Resíduos em Argamassas.....	24
3	Metodologia Experimental	31
3.1	Materiais e Formulações de Argamassas de reboco e Betonilhas em estudo	31
3.2	Caraterização de resíduos	31
3.2.1	Resíduo ASIC.....	31
3.2.2	Resíduo Refratário	33
3.2.3	Resíduo de construção e demolição britado.....	34
3.2.4	Análise granulométrica	37
3.2.5	Determinação da Área Superficial Específica (BET).....	41
3.2.6	Análises térmicas (ATD/TG)	42
3.2.7	Determinação da massa volúmica dos resíduos em estudo	44

3.3	Caraterização e formulação das argamassas e betonilhas em estudo.....	46
3.4	Preparação e caraterização dos produtos no estado fresco	48
3.5	Caracterização dos produtos no estado endurecido	51
3.5.1	Determinação da condutibilidade térmica	52
3.5.2	Determinação da massa volúmica das amostras	53
3.5.3	Determinação do módulo de elasticidade.....	53
3.5.4	Determinação da resistência mecânica à compressão e à flexão.....	54
3.5.5	Ensaio de Capilaridade	56
3.5.6	Avaliação de eflorescências e criptoflorescências.....	57
4	Apresentação e Discussão dos resultados.....	63
4.1	Efeito da incorporação de resíduos no estado fresco das argamassas e betonilhas.....	63
4.2	Efeito de resíduos nas características do estado endurecido das argamassas e betonilhas.....	65
4.2.1	Efeito na condutibilidade térmica.....	65
4.2.2	Efeito na densidade e módulo de elasticidade.....	66
4.2.3	Efeito sobre a resistência mecânica à flexão e à compressão	69
4.2.4	Efeito dos resíduos sobre a capilaridade.....	73
4.2.5	Avaliação da existência de eflorescências e criptoflorescências	77
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	91
6	Referências Bibliográficas	101

Figuras

Figura 1 Pilares da Sustentabilidade (Oliveira, 2010).....	8
Figura 2 Definição de economia circular adaptado de (Presidência do Conselho de Ministros, 2017).	11
Figura 3 Estratégias de Economia Circular adaptado de (Potting et al., 2017).....	12
Figura 4 Processo de produção de argamassa (APFAC, 2020).....	15
Figura 5 Resíduo ASIC e diferentes granulometrias.....	33
Figura 6 Resíduo refratário e diferentes granulometrias	34
Figura 7 Processamento dos RCD's (RCD- Resíduos de Construção e Demolição SA, 2014)	35
Figura 8 Agregados recuperados de granulometria fina (0-10mm) (RCD- Resíduos de Construção e Demolição SA, 2014)	35
Figura 9 Equipamentos para análise da distribuição granulométrica.....	38
Figura 10 Distribuição granulométrica dos resíduos em estudo	39
Figura 11 Análise granulométrica da Areia.....	40
Figura 12 Curva granulométrica dos resíduos em estudo: ASIC, Resíduo Refratário e Resíduo Britado Mesclado	40
Figura 13 Distribuição granulométrica do resíduo ASIC.....	41
Figura 14 Análise térmica diferencial e gravimétrica do resíduo ASIC	43
Figura 15 Análise térmica diferencial e gravimétrica do resíduo Refratário	43
Figura 16 Análise térmica diferencial e gravimétrica do Resíduo Britado Mesclado.....	44
Figura 17 Equipamentos e utensílios para a amassadura	48
Figura 18 Mesa de espalhamento e molde tronco cônico.....	49
Figura 19 Esquema figurativo do processo de endurecimento da pasta até ao processo de tempo de cura.....	50
Figura 20 Amostras para testar a condutibilidade térmica	52
Figura 21 Amostras utilizadas na determinação da massa volúmica	53
Figura 22 Aparelho PUNDIT e amostra.....	54
Figura 23 Materiais e equipamentos para os ensaios à resistência à flexão e à resistência à compressão	55
Figura 24 Amostras imersas e materiais e equipamentos utilizados para o ensaio à capilaridade.....	57

Figura 25 Rótulo da embalagem de sulfato de zinco	59
Figura 26 Medidor de pH	60
Figura 27 Recipiente da água destilada	60
Figura 28 Balança de precisão.....	60
Figura 29 Solução de sulfato de zinco.....	60
Figura 30 Solução de sulfato de zinco após o ensaio	60
Figura 31 Recipiente vazio para colocar a solução de sulfato de zinco utilizado	60
Figura 32 Rótulo da embalagem do sulfato de sódio	61
Figura 33 Solução de sulfato de sódio.....	61
Figura 34 Solução de sulfato de sódio após o ensaio	61
Figura 35 Solução de água destilada antes do ensaio.....	61
Figura 36 Solução de água destilada após o ensaio.....	61
Figura 37 Amostras para o ensaio de condutibilidade térmica.....	65
Figura 38 Resultados da Resistência à Flexão das Argamassas.....	69
Figura 39 Resultados da Resistência à Flexão das Betonilhas	69
Figura 40 Amostras antes da resistência à flexão.....	70
Figura 41 Amostras após a resistência à flexão	70
Figura 42 Resultados da Resistência à Compressão das Argamassas	70
Figura 43 Resultados da Resistência à Compressão das Betonilhas	71
Figura 44 Amostras antes da resistência à compressão.....	71
Figura 45 Amostra após a resistência à compressão	71
Figura 46 Betonilha BSA2 aos 90 dias	72
Figura 47 Betonilha BRR aos 90 dias	72
Figura 48 Resultados dos coeficientes de capilaridade das argamassas curadas a 28 dias	74
Figura 49 Resultados dos coeficientes de capilaridade das argamassas curadas a 90 dias	75
Figura 50 Resultados dos coeficientes de capilaridade das betonilhas curadas a 28 dias..	75
Figura 51 Resultados dos coeficientes de capilaridade das betonilhas curadas a 90 dias..	76
Figura 52 Amostras submetidas ao ensaio de capilaridade	76
Figura 53 Amostras em cubos para ensaio à existência de sais	77
Figura 54 Resultado final das amostras após imersão em solução de sulfato de sódio.....	79
Figura 55 Evolução das amostras de argamassas imersas em solução de sulfato de sódio	80
Figura 56 Evolução das amostras de betonilhas imersas em solução de sulfato de sódio .	81

Figura 57 Resultado final das amostras após imersão em solução de sulfato de zinco.....	83
Figura 58 Evolução das amostras de argamassas imersas em solução de sulfato de zinco	84
Figura 59 Evolução das amostras de betonilhas imersas em solução de sulfato de zinco .	85
Figura 60 Resultado final da evolução das amostras após imersão em solução de água destilada.....	87
Figura 61 Evolução das amostras de argamassas imersas em solução de água destilada ..	88
Figura 62 Evolução das amostras de betonilhas imersas em solução de água destilada....	89
Figura 63 Evolução das amostras de betonilhas imersas em solução de água destilada (continuação)	90

Tabelas

Tabela 1 Resumo das características e vantagens dos resíduos em estudo (HARSCO ENVIRONMENTAL, 2019) (Sako & Pandolfelli, 2014) (RCD- Resíduos de Construção e Demolição SA, 2014)	36
Tabela 2 Resumo das características e vantagens dos resíduos em estudo (HARSCO ENVIRONMENTAL, 2019) (Sako & Pandolfelli, 2014) (RCD- Resíduos de Construção e Demolição SA, 2014) - continuação	37
Tabela 3 Valor de área superficial específica do resíduo ASIC	42
Tabela 4 Determinação da densidade dos resíduos em estudo	45
Tabela 5 Descrição das argamassas estudadas e respetiva composição	46
Tabela 6 Descrição das betonilhas estudadas e respetiva composição.....	47
Tabela 7 Classificação para as propriedades do produto endurecido, adaptado de (CEN (Comité Européen de Normalisation), 2003)	51
Tabela 8 Percentagem de água e espalhamento das argamassas	63
Tabela 9 Percentagem de água e espalhamento das betonilhas	64
Tabela 10 Valores de condutibilidade térmica das amostras.....	66
Tabela 11 Densidade e Módulo de Elasticidade das Argamassas	67
Tabela 12 Densidade e Módulo de Elasticidade das Betonilhas	68
Tabela 13 Quadro-resumo dos ensaios laboratoriais	94
Tabela 14 Quadro-resumo dos ensaios laboratoriais (continuação).....	95
Tabela 15 Quadro-resumo dos ensaios laboratoriais – ensaios mecânicos	96
Tabela 16 Quadro-resumo dos ensaios laboratoriais – ensaios mecânicos (continuação)	97

Tabela 17 Quadro-resumo dos ensaios laboratoriais – avaliação de eflorescências e criptoflorescências 98

Equações

Equação 1 Massa Volúmica das Partículas 44

Equação 2 Massa Volúmica da Amostra..... 53

Equação 3 Determinação do Módulo de Elasticidade 53

Equação 4 Resistência à Flexão 54

Equação 5 Coeficiente da Capilaridade..... 56

Lista de símbolos

ρ_a	massa volúmica do material impermeável das partículas
ρ_w	massa volúmica da água (Mg/m^3)
M_2	massa do picnómetro contendo o provete de agregado saturado, em gramas
M_3	massa do picnómetro apenas cheio de água, em gramas
M_4	massa no ar do provete seco em estufa, em gramas.
ρ	massa volúmica da amostra
M	massa em gramas da amostra
V	volume da amostra em dm^3
E_d	módulo de elasticidade (MPa)
ν	coeficiente de Poisson
F	carga máxima aplicada à amostra
l	distância entre os eixos dos rolos de suporte
b	largura da amostra
d	profundidade da amostra
C	Coeficiente de absorção

1 Introdução

1.1 Enquadramento

A população mundial tem vindo a sofrer alterações nos últimos anos através de grandes desenvolvimentos sociais e tecnológicos. Nos últimos anos verificou-se também um grande risco de esgotamento de recursos naturais e a necessidade de encontrar novos materiais e novas técnicas construtivas para ultrapassar este problema mundial.

De facto, *“O presente é o resultado dos pensamentos do passado, e o futuro será moldado pelos pensamentos no presente”*, ou seja, o que se pensou em construir e desenvolver no passado, está a ser desenvolvido no presente, e o que a sociedade pensar no presente em desenvolver, só será realizado futuramente. Atualmente tornou-se evidente que se deve passar de uma economia linear para uma economia circular, reciclando e reutilizando os materiais para que não haja desperdício, obtendo-se produtos equivalentes com menos recursos naturais e que durem o maior tempo possível, incentivando à circularidade das soluções, ou seja, que os produtos que se pretende que sejam desenhados, produzidos, comercializados, mantidos, sejam reutilizados ou remanufacturados, ou então, reciclados, até haver 0% de desperdícios.

Ao mesmo tempo que se fomenta a economia circular existe, também em paralelo, o conceito de sustentabilidade que a abrange e que é já hoje um conceito fundamental na sociedade, sendo definida como a capacidade de o ser humano interagir com o mundo, preservando o meio ambiente para não comprometer os recursos naturais das gerações futuras.

O sector da construção civil tem sido responsável por uma percentagem considerável de resíduos em Portugal e no mundo, sendo que tem havido por toda a parte uma má gestão de resíduos de construção e demolição (RCD) entre outros, resultando na deposição de resíduos no meio ambiente e provocando a degradação das paisagens, em alguns casos colocando em risco o ambiente e a saúde humana.

Em contrapartida, os RCD e outro tipo de resíduos poderão substituir matérias-primas evitando assim a sua extração, e resultando em benefícios ambientais, como por exemplo, a diminuição da pegada de carbono e a deposição de resíduos para aterro. Com isto, implementa-se assim, um modelo de economia circular na construção, que irá prevenir a produção de mais RCD e outros resíduos e incentivar a sua valorização, algo fundamental

para o contributo do setor para uma economia circular, ajudando ao fecho do ciclo dos materiais.

Contribuindo a construção circular para a redução na utilização de matérias-primas e a reutilização de produtos e materiais sempre que possível, ela é mais do que a reciclagem dos materiais de construção após a demolição de um edifício.

O decreto-lei nº73/2011 aborda o que é a prevenção, reutilização, preparação para a reutilização, tratamento, reciclagem e a diferença entre os conceitos de valorização e eliminação de resíduos. Pretendeu que até ao ano de 2020 se determinassem metas de preparação para reutilização, reciclagem e outras formas de valorização material de resíduos. Saliente-se também que a reciclagem permite o cumprimento das metas, ao mesmo tempo que preserva os recursos naturais embora fique aquém perante os desafios de uma economia mais circular (M. A. O. T., 2011).

Tudo isto vai de encontro à necessidade de produzir e usar materiais de modo sustentável, mas devendo possuir um desempenho equivalente a um produto convencional, mas com uso eficiente de recursos no seu processamento e utilização, começando assim a surgir no mercado vários exemplos de novas soluções construtivas com este propósito e enquadramento, contribuindo para o modelo de economia circular.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal estudar e desenvolver argamassas que possuam na sua composição resíduos como alternativa a matérias primas naturais numa perspetiva de contribuir para o modelo de economia circular. Analisam-se primeiro os resíduos selecionados, do ponto de vista da viabilidade de incorporação e depois, procura-se identificar os problemas que poderão surgir da substituição dos agregados naturais pelos resíduos, estudando-se também o efeito dessa substituição. Por fim, faz-se um estudo de viabilidade da solução otimizada da argamassa em estudo, para que seja utilizada nas aplicações para que foi desenhada, com desempenho equivalente à argamassa convencional.

1.3 Organização da dissertação

O desenvolvimento da presente dissertação enquadrou-se num estágio realizado entre os laboratórios do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e da Empresa Saint-Gobain Portugal (Weber). Para que se pudesse atingir os objetivos pretendidos com esta dissertação, foram desenvolvidas e avaliadas formulações, a partir de betonilhas da empresa referida e de outros materiais para a formulação das argamassas.

Esta forma, este trabalho envolveu um estudo experimental, que avaliou a viabilidade de incorporação de resíduos em argamassas e betonilhas, verificando se se encontram dentro dos parâmetros exigidos à sua aplicação.

Para que isto seja possível, a presente dissertação está dividida nos seguintes capítulos para uma melhor compreensão do trabalho desenvolvido, sendo estes:

Capítulo 1 – Introdução;

Neste capítulo é descrito o enquadramento do trabalho desenvolvido, e os objetivos pretendidos para a realização do mesmo.

Capítulo 2 – Argamassas, Sustentabilidade e Economia Circular;

Neste capítulo faz-se uma breve descrição dos conceitos necessários, como argamassas, sustentabilidade e economia circular para dar a conhecer os conceitos necessários para o desenvolvimento do trabalho.

Capítulo 3 – Metodologia experimental;

Neste capítulo são descritos os vários ensaios e procedimentos que são necessários para o estudo e desenvolvimento das argamassas e betonilhas, desde a análise dos agregados e resíduos até ao produto final.

Capítulo 4 – Apresentação e Discussão dos Resultados;

Neste capítulo são apresentados os resultados com algumas críticas construtivas acerca se os resultados eram os esperados ou não, e qual a razão.

Capítulo 5 – Conclusões e Trabalhos Futuros;

Neste capítulo são apresentadas as conclusões finais, fazendo uma síntese geral do trabalho, expondo as principais vantagens e conselhos para melhorar, e benefícios que poderão favorecer o setor da construção.

Capítulo 6 – Referências Bibliográficas.

Neste capítulo são apresentadas as referências utilizadas ao longo desta dissertação.

2 Argamassas, Sustentabilidade e Economia Circular

2.1 Conceitos de Sustentabilidade na Construção

O debate sobre a importância da sustentabilidade tornou-se um tema essencial e recorrente na opinião pública a partir dos anos noventa do século XX. Como consequência, a procura por produtos e serviços que seguissem os padrões estabelecidos pelo conceito da sustentabilidade aumentaram. A Sustentabilidade é um tema que tem preocupado a sociedade ao longo dos anos. A primeira conferência conhecida sobre este tema foi a “Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiental em 1972 em Estocolmo, na Suécia, onde se considerou a necessidade de estabelecer uma visão global e princípios comuns”, que servissem de motivação e sentido para conduzir os povos do mundo na preservação e na melhoria do meio ambiente (Conferência das Nações Unidas, 1972). O sector da Construção tem vindo a ser o maior consumidor de recursos naturais e o que produz um maior número de resíduos sólidos urbanos. Cada vez mais, nos últimos anos, existe um maior esgotamento de recursos naturais, o que tem levado à procura de novas técnicas construtivas e o recurso a alternativas de novos materiais e da substituição de certos resíduos noutros materiais. O Desenvolvimento Sustentável permite corresponder às necessidades do presente sem colocar em risco o crescimento das gerações futuras, visando melhorar as condições de vida dos indivíduos através do uso eficiente de recursos, preservando também o meio envolvente a curto, médio e longo prazo.

Segundo a União Europeia (European Commission, 2017) a *”eficiência de recursos significa usar os recursos limitados da Terra de maneira sustentável, minimizando os impactos no meio ambiente”*. Isto irá permitir criar mais com menos e obter maior valor com menos recursos. A iniciativa da Europa fez parte da Estratégia Europa 2020, a estratégia de crescimento da UE para uma economia inteligente, inclusiva e sustentável, apoiando a alteração para um crescimento sustentável através de uma economia hipocarbónica e eficiente em recursos.

A Estratégia Europa 2020 pretendeu fazer que houvesse um aumento de 75% das pessoas entre os 20 e 64 anos a trabalharem, um aumento de 3% do PIB da UE a investir em investigação e desenvolvimento, de onde resultasse menos 20% de emissões de gases com efeito de estufa do que os níveis de 1990 e , ainda, fazer com que 20% da energia fosse

proveniente de energias renováveis e houvesse 20% de aumento na eficiência energética (APA, 2015).

Segundo a APA (Agência Portuguesa do Ambiente), pretendia-se que em 2020 os Estados-Membros atingissem uma taxa de reciclagem de 50% para os resíduos sólidos urbanos e de 70% para os resíduos de construção e demolição (RCD). A diretiva sugere uma hierarquia de 5 passos onde a prevenção é a principal opção, seguindo-se a reutilização, reciclagem e outras formas de recuperação, sendo a deposição em aterro o último recurso. Transformar os resíduos em recursos é o principal objetivo para uma economia circular em que os recursos são usados de modo sustentável (APA, 2015).

De acordo com Teodoro (Teodoro, 2011) está integrada no tema Sustentabilidade a reciclagem, que consiste no reaproveitamento de materiais utilizando-os como matéria-prima de um mesmo ou novo produto. Sendo que, *“na construção civil e tendo em conta a enorme quantidade de resíduos que são desperdiçados, a reciclagem é a melhor solução para a produção de novos materiais, poupando os recursos naturais do planeta”*. Outra via sustentável de poupar os recursos é a reutilização dos materiais, que consiste no reaproveitamento de materiais para o mesmo fim, não passando forçosamente por processos industriais, sendo uma solução complementar ou alternativa da reciclagem.

A construção sustentável é vista como o modo de construção que visa responder, tal como o desenvolvimento sustentável, nas vertentes ambiental, sócio-económica e cultural. Os impactos da construção sustentável no desenvolvimento urbano são importantes para a criação de um ambiente construído justo para as gerações futuras. Uma construção sustentável permite construir com, de acordo com (Teodoro, 2011):

- Mais conforto;
- Mais segurança, por exemplo, havendo um maior controlo ativo/passivo;
- Mais durabilidade, nos materiais e soluções construtivas;
- Mais reciclagem e reutilização de materiais e sistemas;
- Mais economia de recursos (energia, água e materiais);
- Menos acidentes de trabalho.

Segundo Teodoro (Teodoro, 2011), o sector da construção é o sector mais ativo e maior em toda a Europa, representando uma percentagem de 28,1% em relação a todos os outros setores e 7,5% do emprego na indústria e na economia europeia.

Uma definição de Construção Sustentável, aceite internacionalmente, foi apresentada por Charles Kibert em 1994, que a definiu como a "*criação de um ambiente construído saudável, tendo em consideração os princípios ecológicos e a utilização eficiente dos recursos*". (Pinheiro, 2006). A sustentabilidade não é uma opção, mas a garantia da manutenção dos recursos naturais do planeta, proporcionando ao mesmo tempo soluções de desenvolvimento para a sociedade e para os seres humanos no futuro.

Pode-se pensar em três pilares base de suporte à sustentabilidade a saber, segundo (Leoneti; et al., 2016), (Teodoro, 2011), (Oliveira, 2010):

- Sustentabilidade Ambiental

Atua sobre a conservação do meio ambiente, mantendo a qualidade de vida e os ecossistemas em conformidade com a vida das pessoas. A sustentabilidade ambiental permite manter e cuidar da biodiversidade e da manutenção dos recursos numa perspetiva de renovação evitando desastres ecológicos ou o aumento dos gases de efeito de estufa e outros impactos negativos uma vez que atualmente um dos desafios da humanidade é preservar o seu padrão de vida e manter o desenvolvimento tecnológico sem esgotar os recursos naturais do planeta.

- Sustentabilidade Económica

A Sustentabilidade Económica permite garantir o desenvolvimento levando em consideração as estratégias que não provoquem impactos ambientais ou que diminuam a qualidade de vida da população. Vê-se cada vez mais as empresas a preocuparem-se com o meio ambiente, incluindo na sua estratégia comercial e de marketing. Para as empresas, sustentabilidade, não é mais uma responsabilidade social sendo também uma vantagem competitiva. Isto porque uma empresa que se preocupa com a sustentabilidade é aquela que se interessa pelo planeta, se preocupa com a comunidade e com o meio ambiente, sendo bem visto aos olhos do público, o seu mercado.

A sustentabilidade nas empresas está ligada à sustentabilidade económica, sendo alcançada através de um modelo de gestão sustentável, ou seja, um modo que permite recuperar o capital financeiro, humano e natural da empresa.

- Sustentabilidade Social

A Sustentabilidade Social revela-se num conjunto de medidas estabelecidas para promover o equilíbrio, a justiça e o bem-estar na sociedade, através de iniciativas que possuem como objetivo ajudar os membros da sociedade que enfrentam condições

desfavoráveis. A Sustentabilidade Social pretende também garantir a diminuição das desigualdades sociais, da violência e também o aumento da qualidade de vida.

Em termos da Sustentabilidade Social, destacam-se algumas medidas ou ações como o incentivo aos programas de inclusão social, investimento em saneamento básico, incentivo aos projetos de qualificação profissional, entre outros.

Resumindo, pode-se representar a sustentabilidade como assentando em três pilares principais: Social, Ambiental e Económico (figura1).

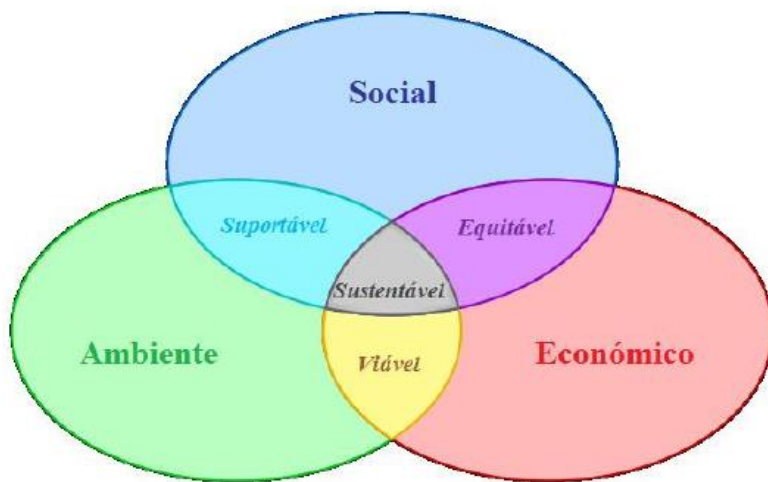


Figura 1 Pilares da Sustentabilidade (Oliveira, 2010)

Existem também algumas atitudes gerais em termos de comportamento que devem ser tomadas em conta para uma maior Sustentabilidade, segundo (Leoneti; et al., 2016), (Oliveira, 2010), (Teodoro, 2011):

- Evitar o desperdício da água;
- Usar fontes de energia renováveis (geotérmica, eólica, hidráulica, entre outras);
- Manter preservados os espaços verdes, evitando exploração com fins económicos;
- Racionalizar e controlar a exploração de recursos minerais (carvão, petróleo, minérios, entre outros) criando estratégias que permitam o menor impacto possível para o meio ambiente;
- Reciclar e fazer a recolha seletiva do lixo;
- Dar prioridade ao consumo de produtos biodegradáveis.

A aplicação de estratégias e ações sustentáveis sublinha a importância de garantir uma maior qualidade de vida da população (Leoneti; et al., 2016).

2.2 Conceitos de Economia Circular

Segundo o “O Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal” (Presidência do Conselho de Ministros, 2017), *“Uma economia circular é entendida como uma economia que promove ativamente o uso eficiente e a produtividade dos recursos por ela dinamizados, através de produtos, processos e modelos de negócio assentes na desmaterialização, reutilização, reciclagem e recuperação dos materiais. Desta forma, procura -se extrair valor económico e utilidade dos materiais, equipamentos e bens pelo maior tempo possível, em ciclos energizados por fontes renováveis. Os materiais são preservados, restaurados ou reintroduzidos no sistema de modo cíclico, com vantagens económicas para fornecedores e utilizadores, e vantagens ambientais decorrentes de menor extração e importação de matérias-primas, redução na produção de resíduos e redução de emissões associadas.”*

O portal Eco.nomia (República Portuguesa; Ambiente, 2020a), refere que a Economia Circular é uma ferramenta económica, regenerativa e restauradora, que visa manter os recursos (materiais, componentes, produtos, serviços) pelo maior tempo possível no sistema de produção e consumo, preservando e privilegiando deste modo o seu valor. Desta forma, aumenta-se a produtividade dos recursos, preserva-se o capital natural e também o capital financeiro das empresas e da sociedade civil.

Este conceito de economia circular permite trilhar um percurso que vai ao encontro das Políticas públicas, facilitando a circulação e o aproveitamento de recursos, com vista a respeitar sempre a preservação do capital natural, do Investimento (intervindo no sistema económico, definindo instrumentos financeiros e apoiando projetos específicos) e do Conhecimento (promovendo a interação e a colaboração na investigação e desenvolvimento até às boas práticas).

O objetivo da Economia Circular é que os produtos sejam desenhados, produzidos, vendidos, comercializados, mantidos e depois reutilizados, remanufacturados e, em último caso, que possam ser reciclados. Neste caso, a reciclagem surge como o melhor do pior, pois é a última fase de valor pois só consegue recuperar parte do valor do material.

Na regeneração natural, pretende-se manter os custos biológicos sempre em circulação, isto é, os resíduos de matéria orgânica serem aproveitados, e também, produtos que possam substituir produtos não renováveis ou produtos que não possam ser extraídos.

A economia circular assenta na preservação e na valorização do capital natural e na minimização de desperdícios (República Portuguesa; Ambiente, 2020b) , (MacArthur, 2017), (Cotec Portugal, 2016).

Assim, a economia circular baseia-se em alguns princípios fundamentais como, segundo (República Portuguesa; Ambiente, 2020b), (MacArthur, 2017), (Cotec Portugal, 2016):

- Desenhar produtos mais duradouros utilizando menos recursos e de preferência renováveis;
- Conceber produtos e serviços sem resíduos ou poluição, ou seja, promovendo a eficiência energética, hídrica e a eficiência de materiais e matérias primas;
- Conceber com o pensamento de manter os materiais em uso, ou seja, maximizar a vida útil do produto e otimizar a possibilidade de reparação e de reutilização;
- Regenerar os sistemas naturais e recursos naturais, ou seja, reutilizar, remanufaturar ou reciclar, promovendo a reconversão de resíduos em novos produtos, matérias primas ou materiais de maior valor;
- O modelo circular deve ser centrado nas pessoas, ou seja, para o implementar são necessárias pessoas, enquanto uma fonte renovável que se apoia no trabalho, devendo minimizar-se externalidades negativas.

Todos estes princípios descritos acima, podem-se ver esquematicamente na figura 2.



Figura 2 Definição de economia circular adaptado de (Presidência do Conselho de Ministros, 2017).

Existem então, ferramentas que nos possibilitam esta abordagem de economia circular, tais como, segundo (República Portuguesa; Ambiente, 2020b), (MacArthur, 2017):

- EcoDesign – Desenvolver produtos e soluções de baixo impacto ambiental, pensando nos recursos e sua poupança, dando prioridade a materiais renováveis e não perigosos, bem como à reutilização e reciclagem de matérias primas recuperadas;
- Transformação Digital – Substituição de serviços físicos, por serviços virtuais, novos modelos de negócio que maximizem a produtividade de equipamentos e usem menos recursos;
- Ciclos reversos (simbiose industrial) – Entidades que colaborem no uso eficiente dos recursos de modo a melhorar o seu desempenho económico conjunto, incluindo a partilha de infraestruturas, equipamentos, serviços, utilização de recursos;
- Ciclos de logística – Promovendo iniciativas de utilização, protocolos de qualidade para reciclados, inovação em extração e uso de materiais a partir de fluxos de resíduos;
- Colaboração em contexto - Reconhecendo a importância e a necessidade de atuar no terreno e consciencializar e sensibilizar a sociedade civil.

Estas ferramentas baseiam-se no esquema da figura 3.

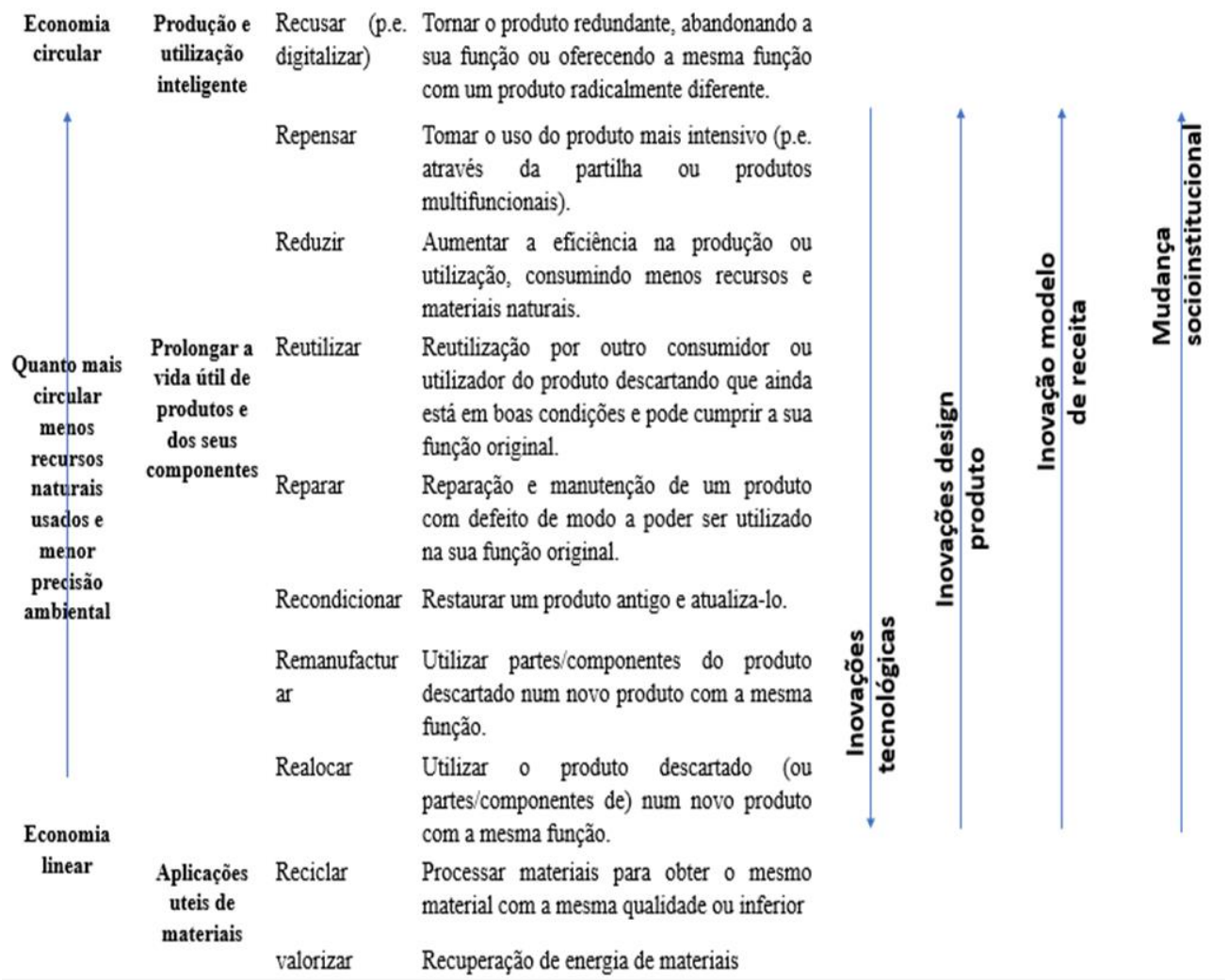


Figura 3 Estratégias de Economia Circular adaptado de (Potting et al., 2017)

Segundo dados estatísticos de (Presidência do Conselho de Ministros, 2017), “Em 2030 seremos um total de 8,5 mil milhões de pessoas no planeta. Mais de metade (56%) serão consumidores de classe média. Mais de metade (59,5%) estarão a viver nos grandes centros urbanos. A revolução industrial despoletou um PIB global crescente, menos pessoas em pobreza extrema, melhores condições de vida e um crescimento populacional. Porém, o sistema operativo atual deste desenvolvimento é linear: extrair recursos, que processamos e transformamos em produtos, que depois vendemos e que, após a sua vida útil, descartamos”. O Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal (Presidência do

Conselho de Ministros, 2017), é o instrumento político para promover a mudança desta lógica de ação, para um modelo de desenvolvimento circular em que não haja desperdícios.

Até à presente data, a economia global tem funcionado à razão de 65 mil milhões de toneladas de materiais extraídos ao ano. O Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal, ao continuar assim, neste ciclo vicioso, em 2050, será o dobro, o que faz com que, em média, cada habitante irá usar mais de 70 % de materiais do que os que necessitou em 2005. Isto implicará maior consumo, maiores emissões de gases com efeito de estufa (GEE), de poluentes para o ar, e de resíduos, ao longo de toda a cadeia de produção até ao consumidor e ao fim de vida. Mais de metade das emissões de GEE a nível mundial têm a haver com a produção de materiais básicos e mais de 70 % dos resíduos associados a um produto são produzidos antes mesmo de o produto ser utilizado. Neste ritmo, em 2050 seriam necessários recursos equivalentes a três planetas para sustentar o nosso modo de vida (Presidência do Conselho de Ministros, 2017).

Se se acelerar a transição da economia linear para a economia circular, haverá, segundo (Cotec Portugal, 2016):

- Mais ganhos (previsão na ordem dos 1,8 triliões de euros por ano até 2030);
- Aumento do PIB de 11% até 2030 e de 27% até 2050, mas se nada se fizer, o aumento será apenas de 4% até 2030 e 15% até 2050;
- Criação de mais emprego e melhor emprego em pequenas e médias empresas (PMEs) através de inovação e empreendedorismo;
- Maior bem-estar das famílias, havendo mais emprego, maior valor e maior orçamento disponível;
- Redução das emissões de dióxido de carbono para a atmosfera;
- Redução do consumo de recursos primários, tais como materiais para a indústria automóvel e construção, terra para imóveis, fertilizantes sintéticos, uso de água na agricultura, combustíveis e eletricidade não renovável;
- Aumento da produtividade da terra, ou seja, reduzir o consumo de fertilizantes o que fará com que melhore a sustentabilidade das terras e o bem-estar das pessoas;
- Redução do custo com o tempo perdido no trânsito;
- Crescimento do negócio, ou seja, aumento das receitas com a introdução de mais serviços e com melhor valor;

- Diminuição da exposição à volatilidade dos preços dos recursos, ou seja, o uso de menos materiais virgens e mais materiais reciclados, reduz a exposição das empresas a preços mais voláteis;
- Culturas organizacionais mais positivas, ou seja, melhoria das condições das empresas e dos colaboradores e parceiros;
- Mais e melhor sustentabilidade dos negócios a médio e longo prazo.

2.3 Argamassas na Construção

2.3.1 Tipos de argamassas e sua aplicação

De acordo com a European Mortar Industry Organization (Huysmans et al., 2020), as argamassas possuem uma tradição que ascende a vários milhares de anos. As argamassas à base de gesso já foram usadas há 10.000 anos. A cal apareceu em 6.000 a.C., mas foram os romanos quem primeiro usaram a cal como constituinte para produzir argamassa. O cimento Portland, que na verdade é o ligante atual mais importante nas argamassas, foi inventado apenas no século XIX.

Anteriormente, segundo (Huysmans et al., 2020), a argamassa era produzida a partir de componentes locais, que se encontravam próximos do local de construção, levando muitas vezes à variação na qualidade e durabilidade deste produto. O crescente desempenho, trabalhabilidade e durabilidade fizeram com que a produção de argamassas feitas no local de obra, passasse para uma produção em fábrica. A figura 4 mostra o processo industrial do tipo de produção de argamassas.

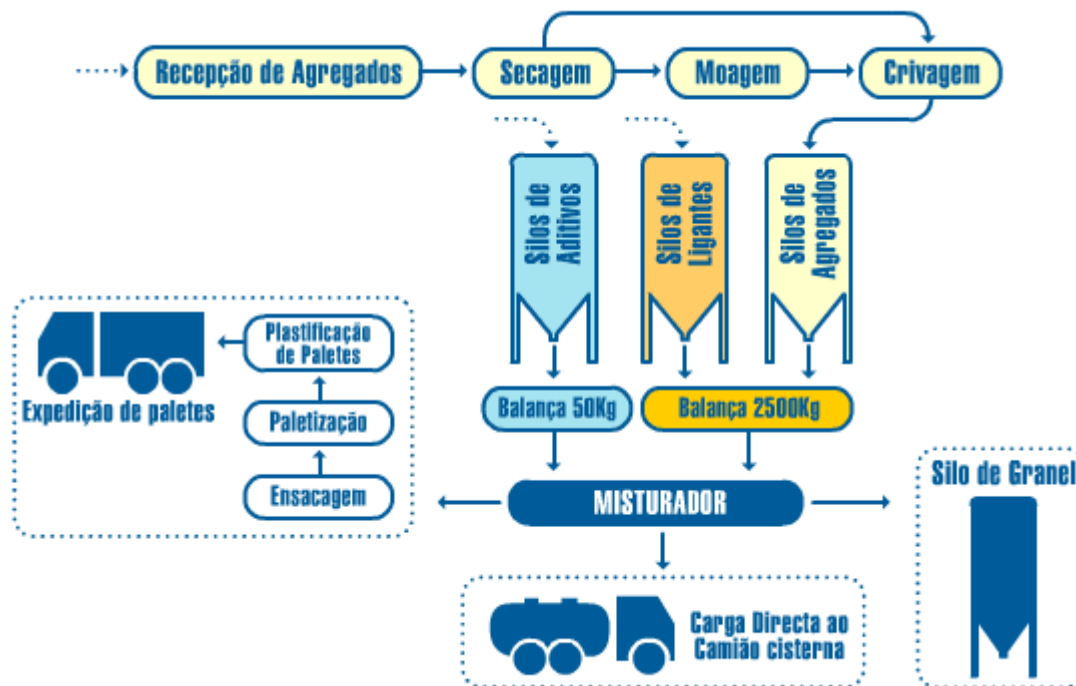


Figura 4 Processo de produção de argamassa (APFAC, 2020)

Definição de argamassa

A definição caracterizante de argamassa pela EMO (Huysmans et al., 2020) é uma mistura de agregados geralmente com um tamanho de grão inferior a 4 mm e um ou mais ligantes e ainda aditivos e adjuvantes. As argamassas com ligantes inorgânicos contêm ainda água na sua formulação. Em suma, uma argamassa envolve uma formulação base com um ligante (cimento ou outros), um aglutinante (água) e agregados (finos ou grossos) para além de algumas adições (aditivos e adjuvantes).

As argamassas referidas como monomassas (APFAC, 2020), são argamassas de aplicação final como revestimento, sendo pré-doseadas e constituídas por ligantes e cargas minerais devidamente selecionadas, enriquecidas com aditivos e adjuvantes (retentores de água, introdutres de ar, hidrofugantes, fibras, inertes leves, resinas ou pigmentos), que lhes conferem as propriedades que as diferenciam das argamassas tradicionais realizadas em obra. As monomassas visam melhorar a resistência à fendilhação, através da menor retração e maior deformabilidade, sendo geralmente mais eficientes no cumprimento dessa função que a maioria dos rebocos tradicionais ou industriais, daí a areia possuir como função essencial reduzir a retração e melhorar a resistência mecânica.

Funções das argamassas

A argamassa tem um papel fundamental na construção, pois é usada para diversos fins tendo como funções importantes, segundo (Huysmans et al., 2020):

- Unir os materiais (por exemplo, argamassa de alvenaria e argamassa adesiva para ladrilhos);
- Fornecer um acabamento nivelado ou suave (por exemplo, argamassa de pavimento, reboco interno),
- Proteger contra o intemperismo (por exemplo, renderização externa);
- Melhorar o isolamento térmico das paredes (por exemplo, sistemas compostos de isolamento térmico externo, argamassa para alvenaria de isolamento térmico, argamassa de alvenaria leve);
- Reparar e renovar construções (por exemplo, argamassa de reparação de betão, argamassa de impermeabilização ou argamassa de renovação).

Em suma, as argamassas acabam por desempenhar funções estruturais (como constituinte importante das alvenarias, pedras ou blocos), funções de proteção (no refechamento de juntas e em revestimentos exteriores de paredes), funções de colagem (de ladrilhos e azulejos) e funções decorativas (em estuques e barramentos).

Propriedades das argamassas

Em relação às propriedades das argamassas, segundo alguns autores (Illston, J. M.; Domone, 2001), os agregados formam a maior parte do volume da mistura, 70-80%, sendo o restante ocupado praticamente pelo ligante (cimento ou outro), a água e algumas adições (aditivos e adjuvantes). Há nas argamassas também uma certa quantidade de vazios criada quando a mistura é produzida e aplicada.

As propriedades das argamassas são afetadas pelas quantidades dos constituintes, ou seja, pelas suas proporções na mistura. Para assegurar as propriedades pretendidas, as proporções da mistura devem ser cuidadosamente escolhidas e controladas. A relação entre os pesos da água e o cimento, normalmente referida apenas como a relação água/cimento, é um fator importante que influencia também muitas das propriedades da argamassa. Os valores desta relação estão normalmente no intervalo de 0,3 a 1,0 (Illston, J. M.; Domone, 2001).

As propriedades das argamassas podem ser classificadas em duas categorias relacionadas com o seu estado físico, em fresco ou endurecido (Limbachiya; Dhir, Ravindra K.; C., 1999).

Algumas propriedades importantes da argamassa no estado endurecido são a densidade, a permeabilidade, o módulo de Young, a resistência à compressão, a resistência à flexão, a força de adesão e a retração de secagem.

As propriedades importantes da argamassa no estado fresco, são a *trabalhabilidade*, isto é, quão fácil se torna manusear e colocar na alvenaria; o *tempo aberto da mistura*, isto é, quanto tempo ela pode ser trabalhada após a mistura; a *retenção de água*, importante para o completo endurecimento das misturas. Esta propriedade refere-se à facilidade com que é removida a água da argamassa, da mesma maneira que um tijolo ou bloco remove, por sucção, a água da argamassa na junta enquanto ainda está na fase plástica (Limbachiya; Dhir, Ravindra K.; C., 1999).

A argamassa, segundo (Illston, J. M.; Domone, 2001), para obter um desempenho ideal, deve ter a sua composição adaptada à aplicação. Os princípios gerais são os seguintes, segundo (Illston, J. M.; Domone, 2001):

- As argamassas com alto teor de cimentos hidráulicos são mais fortes, mais densas, mais impermeáveis e mais duráveis, ligam-se melhor às partículas em circunstâncias normais e endurecem rapidamente em temperaturas normais. Isto também leva a uma alta retração de secagem e rigidez da alvenaria.
- As argamassas com reduzido ou nenhum teor de cimentos hidráulicos são mais fracas e mais dúcteis e, portanto, mais tolerantes ao movimento. Há uma redução correspondente na taxa de encolhimento e endurecimento.
- As argamassas feitas com areias bem graduadas podem ter resistência à compressão muito alta, baixa permeabilidade e geralmente boa ligação, mas baixa trabalhabilidade, enquanto que areias finas proporcionam alta trabalhabilidade, mas geralmente com resistência à compressão reduzida e, às vezes, reduzida ligação.
- A adição de cal confere plasticidade e, particularmente, para as misturas húmidas, retenção da água (a capacidade de a argamassa reter a água em contato com suportes muito absorventes), o que facilita o processo de assentamento e garante que o cimento se possa hidratar.
- A incorporação de ar quando da mistura melhora a resistência ao gelo-degelo da argamassa e permite a utilização de menores razões água/cimento, mas essas misturas plastificadas podem ser menos duráveis e retentoras de água do que misturas de cal equivalentes.

- A adição de pigmentos enfraquece a argamassa e o conteúdo nunca deve exceder 10% do peso do cimento na argamassa. As cinzas são um caso especial e deve ser limitado a 3%.
- Os aditivos de látex polimérico podem melhorar algumas propriedades, como a adesão, a resistência à flexão e a resistência à permeabilidade da água e do ar, mas como são dispendiosas, devem ser usadas apenas quando houver uma necessidade específica.
- Retardadores de presa são amplamente utilizados na produção de argamassas pré-misturadas, entregues no local. O retardador é doseado conforme exigido pelo fornecedor.
- A argamassa tem uma condutividade térmica relativamente alta e, portanto, contribui para a perda de calor nas paredes de baixa densidade. Para obter melhor isolamento térmico, estão disponíveis argamassas isolantes que usam agregados de baixa densidade para as partículas de areia grossa.

Classificação das argamassas

Segundo a Norma Europeia EN998-2: Specification for mortar for masonry - Part 2: Masonry mortar Définitions (CEN (Comité Européen de Normalisation), 2010), as argamassas são classificadas de acordo com três critérios:

- *Local de produção*: argamassas industriais, argamassas industriais semi-acabadas e argamassas tradicionais;
- *Modo de conceção*: argamassas de desempenho e argamassas de formulação;
- *Modo de aplicação*: argamassas de alvenaria, argamassas de revestimento, argamassas de regularização de pavimentos, argamassas de juntas e argamassas-cola.

Argamassas industriais em função do tipo de aplicação/ uso

De acordo com a Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas e ETICS (APFAC, 2020), existe uma grande variedade de argamassas de construção industriais, das quais se destacam:

- Argamassas de Assentamento de Alvenaria, são usadas para produzir muros e paredes de tijolo ou bloco, podendo ou não ser hidrofugadas.
- Argamassas para Reboco, são usadas para revestir paredes e muros, podendo ser hidrofugadas ou não. O acabamento final pode ser de revestimento cerâmico, pintura ou de

acabamentos com cores variadas ou texturas especiais. Os rebocos podem conter propriedades térmicas melhoradas, contribuindo para a eficiência energética.

- Argamassas cola ou adesivas, são usadas para colar elementos cerâmicos ou outros sobre um suporte, quer de reboco quer sobre a parede ou pavimento.
- Argamassas para juntas, são usadas para preencher as juntas entre os elementos dos revestimentos. Podem ter funções estéticas (apresentando uma cor semelhante ao elemento de revestimento) ou funcionais (tendo, por exemplo, propriedades impermeabilizantes).
- Argamassas para Regularização de Pavimentos (Betonilhas), são argamassas secas (argamassas pré-preparadas, sendo argamassas que vêm em sacos ou silos) usadas na regularização de pavimentos interiores e na execução de camadas de enchimento, e podem ser revestidas com vários tipos de pavimentos, como azulejo, pavimento flutuante, entre outros. As vantagens deste tipo de argamassa, argamassas secas, (argamassas prontas para uso entregues por camiões betoneiras, geralmente trabalhável 36 horas) são: reduzir o desperdício em obra, aumentar a produtividade na aplicação, possuir boa trabalhabilidade, ter uma formulação controlada, ter matérias-primas selecionadas.

As definições adotadas pela European Mortar Industry Organization (Huysmans et al., 2020) dos tipos de argamassas atualmente mais comuns são:

- Argamassa industrial – argamassa doseada e misturada em fábrica. Pode apresentar-se em pó, requerendo apenas a adição de água, ou em pasta, já amassada fornecida pronta a aplicar.
- Argamassa industrial semi-acabada – argamassa pré-doseada, a modificar em obra.
- Argamassa pré-doseada – componentes doseados em fábrica e fornecidos para obra, onde serão misturados segundo instruções e condições do fabricante.
- Argamassa pré-misturada – componentes doseados e misturados em fábrica, fornecidos à obra, onde serão adicionados outros componentes que o fabricante especifica ou também fornece.
- Argamassa feita em obra (tradicional) – argamassa composta por constituintes “tradicionalis” (por exemplo: ligantes, agregados e água), doseados e misturados em obra.
- Argamassa em pasta (fresca) – argamassa doseada, misturada e amassada, pronta a aplicar.
- Argamassa hidráulica – argamassa que contém um ligante mineral hidráulico, que endurece com água.

- Argamassa em dispersão – Argamassa de ligante(s) orgânico(s), na forma de polímeros em dispersão aquosa, com aditivos orgânicos, agregados minerais e/ou cargas finas. A mistura está pronta a aplicar.
- Argamassa de resina reativa – mistura de resinas sintéticas, cargas finas e/ou agregados minerais e aditivos orgânicos que endurecem por reação química. Os componentes pré-doseados são embalados prontos a misturar.

2.3.2 Recursos Materiais Naturais usados em Argamassas

Existem vários métodos para formular a composição das argamassas (Pinto et al., 2006) e, geralmente, para definir a composição indica-se o peso de cada componente por metro cúbico de argamassa. Em obra este método é pouco adequado uma vez que requer equipamentos e cuidados precisos em estaleiro. Em obra utilizam-se processos que, embora menos rigorosos, são mais ágeis e de mais fácil controlo. Na base da enunciação está o conceito de traço, definido como sendo a relação entre as proporções de ligante e de areia que entram na composição da argamassa.

A produção de argamassas com ligantes poliméricos ou adjuvantes sintéticos fez com que houvesse uma melhoria de qualidade do produto para algumas específicas e mantendo os requisitos da aplicação na construção. O desenvolvimento das argamassas e o estudo para a otimização destas, tem vindo a aumentar relativamente ao estudo das propriedades dos produtos no estado fresco ou endurecido. Para a produção de argamassas existem diversos recursos materiais naturais, tais como ligantes, agregados e adições diversas extraídos da natureza, para além de outros industrialmente sintetizados.

2.3.2.1 Ligantes

Segundo (Paiva, 2005), como o próprio nome indica, um ligante tem a capacidade de poder juntar uma grande quantidade de agregados, concedendo ao composto, coesão e resistência. Existem vários tipos de ligantes utilizados em argamassas, tais como, o cimento, a cal aérea ou hidráulica, o gesso e algumas resinas orgânicas para aplicações específicas.

Neste momento, o ligante mais utilizado na formulação de argamassas e mais comum, é o cimento tipo Portland (ligante hidráulico), constituindo cerca de 10-20% do volume total do produto (argamassa). É um material composto por pós muito finos ($<120 \mu\text{m}$) que ao

serem associados com a água formam uma pasta, sendo o seu endurecimento provocado pela reação química de hidratação entre o cimento e a água.

Os integrantes principais das matérias-primas do cimento Portland são o calcário e a argila extraídos da natureza e que são fontes de óxido de cálcio (CaO), sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃) e de óxido de ferro (Fe₂O₃). Estas matérias-primas, são misturadas e sujeitas a temperaturas da ordem de 1450 a 1650°C em fornos rotativos, onde por reação química a mistura se transforma em clínquer de cimento, o qual é arrefecido de seguida e reduzido a pó. Adiciona-se ao clínquer pulverizado uma pequena quantidade de gesso (até 5%) com a função de controlar a presa, para além de outras adições. obtendo-se assim diversos tipos de cimento Portland.

2.3.2.2 Agregados

Segundo (Paiva, 2005), os agregados constituem cerca de 70-80% do volume da argamassa, sendo que a sua qualidade possui um papel importante nas propriedades dos materiais cimentícios.

Segundo (Paiva, 2005), o agregado que fica retido no peneiro de malha de 5 mm, é chamado de agregado grosso, caracterizando-se por godo (se for de origem natural ou sedimentar), rolado (se for calhau ou seixo) ou britado (partido artificialmente, contendo formas mais afiadas). Todo o agregado de dimensões inferiores a 5 mm é considerado como areia rolada natural de origem sedimentar, ou areia britada de origem artificial. O tamanho médio de partícula da areia e a sua distribuição granulométrica, a forma das partículas e a presença de impurezas (como por exemplo, o teor em argila), são os principais fatores que afetam a qualidade da areia como agregado e, por conseguinte, também afeta a qualidade da argamassa, pois a areia é o maior constituinte dos agregados e nas argamassas.

A adição de agregados nas argamassas confere vantagens técnicas, pois geralmente o agregado é mais resistente do que a matriz de cimento, conferindo ao conjunto uma maior estabilidade e também maior durabilidade.

2.3.2.3 Água da amassadura

Segundo (Paiva, 2005), a água é um dos elementos mais fundamentais na produção de argamassas, que ao reagir com o ligante, contribui para a hidratação do próprio ligante e coloca em ação as suas propriedades como aglutinante. Ou seja, a água é muito importante

pois promove para além da fluidez necessária à trabalhabilidade, a ligação entre as partículas de cimento e as partículas dos agregados.

Para que a argamassa seja utilizada em obra, a água de amassadura tem que ser superior à que é apenas necessária para hidratar o ligante e ainda ao teor para molhar o agregado (areia) de modo a que este seja unida pelo ligante. Assim, o excesso de água (água livre), que se encontra no sistema, é responsável pela fluidez, mas também pela retração e porosidade final das argamassas endurecidas. O seu aumento em excesso provoca que a resistência e a compacidade diminuam pois aumenta o volume de vazios.

O teor correto da água de amassadura é essencial para as características finais das argamassas, visto que a qualidade desta afeta as características finais do material. De facto, o teor em água de amassadura é considerado o fator mais influente na trabalhabilidade (facilidade de manuseamento e aplicação de uma argamassa) do material cimentício e também nas suas propriedades no estado endurecido.

2.3.2.4 Adições: adjuvantes e aditivos

Segundo (Paulo, 2006), (Paiva, 2005), (Huysmans et al., 2020), os adjuvantes e os aditivos são ambas adições utilizadas com o intuito de alterar as propriedades das argamassas, ajustando-os a certas condições de uso e desempenho pré-estabelecidas. Essas condições estabelecidas, podem ser adquiridas com a utilização de produtos que permitam melhorar a trabalhabilidade, acelerar ou retardar a presa, acelerar o endurecimento nas primeiras idades, aumentar a resistência aos ciclos de gelo-degelo, diminuir a permeabilidade aos líquidos, impedir a segregação e a sedimentação dos seus constituintes, criar uma ligeira expansão na argamassa, produzir argamassas leves ou conferir cor às argamassas.

Os Adjuvantes são substâncias utilizadas em percentagem inferiores a 5% da massa de cimento e que são adicionadas durante a amassadura aos componentes normais das argamassas com a finalidade de alterar algumas propriedades desses materiais, quer no estado fluido, quer no estado sólido ou na altura da passagem de um estado para o outro. Segundo a EMO (Huysmans et al., 2020), “adjuvante é todo o material orgânico ou inorgânico adicionado em pequenas quantidades com o objetivo de modificar as propriedades da argamassa fresca ou endurecida”. O adjuvante pode ser classificado de acordo com a sua ação principal, sendo segundo (Huysmans et al., 2020):

- Modificadores da reologia das argamassas e betões frescos;
- Modificadores de teor de ar de argamassas e betões;
- Modificadores de presa e endurecimento;
- Modificadores da expansão;
- Modificadores da resistência a ações físicas, químicas e biológicas;
- Modificadores da cor.

São classificados pela sua ação principal, mas na aplicação podem apresentar alguns efeitos secundários, tais como, os plastificantes redutores de água de amassadura que podem ser retardadores de presa e os agentes introdutórios de ar que aumentam a resistência ao gelo-degelo pela formação de bolhas de ar e simultaneamente tem o efeito da trabalhabilidade do material e a diminuição da capilaridade.

O uso de adjuvantes influencia na trabalhabilidade dos materiais cimentícios em fresco, através da ação sobre a velocidade de hidratação inicial e da ação da regulação das propriedades reológicas do material cimentício fresco (Paiva, 2005), (Paulo, 2006).

Por outro lado, existem ainda outras adições (os aditivos) que correspondem a substâncias adicionadas à argamassa em quantidades superiores a 5% da massa do cimento, como cargas sem funcionalidade ou com uma função particular.

Os aditivos são materiais inorgânicos ou orgânicos que juntos à argamassa, permitem obter ou melhorar propriedades específicas, por exemplo, melhorando a resistência mecânica e a durabilidade da argamassa. A função dos aditivos é melhorar o desempenho da argamassa e permitir também a redução de custos de produção.

Estas adições podem dividir-se em dois grupos, tais como, segundo (Paulo, 2006):

Aditivos praticamente inertes

- Cargas (Fillers) minerais;
- Pigmentos inorgânicos.

Aditivos pozolânicos ou hidráulicos

- Materiais pozolânicos naturais (argilas calcinadas e finamente moídas);
- Cinzas Volantes (central térmica) – (cinza resultante da queima do carvão mineral moído);
- Sílica de fumo (sílica resultante da produção do silício metálico em fornos elétricos);
- Escórias (resíduos do processo de produção do aço).

2.4 A valorização de Resíduos em Argamassas

Como se tem visto ao longo do tempo, o setor da construção civil tem sido um setor onde se geram muitos resíduos de construção e demolição (RCD) devido à manutenção, reparação, renovação, destruição e/ou demolição de edifícios. Este sector é responsável por um grande volume de resíduos produzidos em Portugal, estimando-se em cerca de 100 milhões de toneladas de produção anual de resíduos de construção e demolição, segundo o referido no Decreto lei nº46/2008 de 12 de março (Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2008). Para contrariar este efeito nocivo, a reciclagem e a reutilização de materiais de construção têm sido nos últimos anos uma aposta muito importante para um desenvolvimento mais sustentável e para a obtenção de uma economia mais circular. O volume de resíduos inorgânicos gerados a cada ano tem vindo a crescer por todo o mundo e é um dos maiores problemas da sociedade moderna. Segundo alguns autores (Wu et al., 2019), cerca de 10 biliões de toneladas de resíduos de construção e demolição são gerados em todo o mundo a cada ano. Nos Estados Unidos são produzidas cerca de 700 milhões de toneladas, a União Europeia gera mais de 800 milhões de toneladas e a China cerca de 2300 milhões de toneladas. Geralmente, cerca de 70 a 80% do total de resíduos são constituídos por restos de tijolos e betões. Esses resíduos inertes, podem ser reciclados como agregados, sendo usados principalmente na pavimentação de estradas ou como agregados reciclados (por exemplo, em argamassas, betões e tijolos). Existe uma menor parcela de resíduos de construção e demolição que podem conter componentes perigosos, como o amianto, fazendo com que haja um impacto grave na saúde humana, na sociedade e no ambiente natural. Assim, há uma necessidade permanente de gerir o desperdício de resíduos de construção e demolição e os impactos a eles associados.

Segundo (Wu et al., 2019), nos últimos anos, o grande desenvolvimento tecnológico aumentou significativamente a produção de bens industrializados e o volume de recursos minerais e naturais explorados. Associado a essa grande expansão, houve um aumento na quantidade de resíduos produzidos em todo o mundo. Normalmente, os resíduos são descartados indiscriminadamente no meio ambiente ou depositados em aterro. É imprescindível para um desenvolvimento sustentável serem consideradas alternativas de reciclagem e reutilização para a gestão de resíduos, de modo a reintroduzir os resíduos no

ciclo produtivo como matérias primas alternativas às naturais, salvaguardando-se assim recursos para as gerações vindouras.

Segundo (Wu et al., 2019), a gestão de resíduos é uma questão que tem vindo a ser muito importante e pertinente também para a saúde pública e para o desenvolvimento industrial, fazendo com que o desenvolvimento de novas tecnologias de reciclagem de resíduos sólidos tenha uma enorme importância ambiental e económica nos tempos de hoje. Para isso têm surgido vários estudos realizados por diversos autores para melhorar o uso e destino dos resíduos, proporcionando uma maior sustentabilidade e uma economia mais circular. Substituindo-se assim alguns recursos naturais por outros materiais reciclados/reutilizados e/ou resíduos de outros materiais que proporcionem as mesmas características e o mesmo ou melhor desempenho que o recurso natural conseguir-se-á atingir estes objetivos.

Segundo vários autores (Ng & Chau, 2015) e (Amponsah et al., 2012), o sector da construção civil tem se destacado pelo elevado desperdício de material e má gestão de resíduos, sendo estes últimos, colocados geralmente em aterros. Os resíduos de construção e demolição são constituídos por fragmentos ou restos de tijolos, argamassas, aço, madeiras, gesso, entre outros. Estudos desenvolvidos têm comprovado que esses resíduos são uma fonte de materiais alternativos de imensa utilidade e que a reciclagem dos mesmos poderá reduzir custos e consumos de matérias-primas naturais bem como os gastos com energia do sector da construção civil.

Segundo (Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2008), (Ng & Chau, 2015) e (Amponsah et al., 2012), a reciclagem e a reutilização de materiais de construção, são neste momento as principais alternativas na procura pelo desenvolvimento sustentável, facilitando a economia de matérias-primas não renováveis e de energia, implicando também a redução dos impactos ambientais causados pelos resíduos na sociedade. Em conjunto com as necessidades da reciclagem e reutilização dos resíduos inorgânicos, prevalece o crescimento populacional acentuando a necessidade de se alcançar materiais de construção com baixo custo e capazes de satisfazer as necessidades de infraestruturas da população. A necessidade da incorporação de resíduos em produtos para a construção civil tem vindo a revelar-se uma excelente alternativa em diversificar a oferta de matérias-primas e proporcionar uma economia de recursos naturais. Em suma, dependendo da composição química e da distribuição do tamanho das partículas, alguns resíduos industriais poderão ser utilizados em argamassas

para a construção civil, seja em substituição parcial do ligante (cimento) ou do agregado fino (areia). Este tipo de abordagem da gestão de RCD, pretende garantir a sustentabilidade ambiental no setor da construção, do ponto de vista da existência de um ciclo de vida do resíduo, adotando para isso medidas de prevenção e de redução na gestão de resíduos nas fases de projeto e execução da obra.

É de salientar, segundo (Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2008), (Ng & Chau, 2015) e (Amponsah et al., 2012), também a importância de promover a reciclagem de RCD, estabelecendo critérios de qualidade, permitindo aos consumidores confiança na utilização e incorporação de resíduos reciclados em novos produtos. Neste contexto, a importância da incorporação destes resíduos reciclados em novos produtos, é de que estes por sua vez, tenham as mesmas qualidades ou melhores do que os produtos produzidos com as matérias-primas originais, preservando assim os recursos naturais.

A reutilização de materiais e o encaminhamento de RCD para reciclagem, obriga segundo o decreto lei nº46/2008 (Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2008), à conceção de condições em obra para que haja uma correta triagem de materiais e de resíduos, através de fluxos e fileiras, sendo que em alternativa, isto pode ser conduzido por um operador de gestão licenciado para poder executar essa operação.

A indústria do cimento é um dos sectores que tem mais contribuído para um elevado impacto ambiental, segundo (Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2008), (Ng & Chau, 2015) e (Amponsah et al., 2012). O processo de produção do cimento requer a utilização de grandes quantidades de recursos naturais, é energeticamente intensivo e emite elevadas taxas de dióxido de carbono para a atmosfera.

Com o presente estudo, o objetivo é encontrar soluções para que se contribua para a mitigação do impacto ambiental provocado pelo uso de recursos naturais, estudando a viabilidade da substituição de alguns constituintes da argamassa por outros materiais, como resíduos de outros processos industriais.

Vários autores, têm vindo a estudar e propor várias soluções. Por exemplo, foi proposto o estudo da incorporação de resíduos de cerâmica em argamassas de cal para reabilitação de edifícios antigos (Matias, 2014), no sentido de dar resposta à problemática deposição de

resíduos em aterro e também à produção de argamassas de reabilitação mais ecológicas e compatíveis com os sistemas de alvenaria e reboco existentes. Foram recolhidos resíduos em indústrias de materiais cerâmicos, como telhas e tijolos, tendo sido posteriormente incorporados em argamassas de cal aérea hidratada e de cal hidráulica natural, cujo desempenho foi de seguida avaliado. As diferentes composições estudadas permitiram analisar a influência no desempenho das argamassas, do tipo, quantidade e granulometria dos resíduos, introduzidos em substituição de constituintes correntes das argamassas, e do tipo e traço de ligante utilizado. Neste caso, os objetivos foram cumpridos e fez com que através da reutilização de resíduos cerâmicos, as argamassas se tornassem mais ecológicas e tecnicamente mais eficientes.

Lucas (Lucas, 2015) estudou a valorização de um resíduo proveniente da indústria cerâmica, procurando compreender se era viável a sua incorporação em argamassas de revestimento. Avaliou a possibilidade de reciclagem de agregados, sendo feita a substituição da areia por resíduos finos de loiça sanitária, preservando a curva granulométrica da areia. Conseguiu avaliar o efeito da incorporação de resíduos de loiça sanitária e também verificar que através da utilização dos resíduos como agregados, é possível obter argamassas com comportamento semelhante ao de uma argamassa padrão, mas com uma grande parte integrante de reciclagem. Permitiu constatar a viabilidade da reutilização destes resíduos em argamassas de cimento, cujo depósito em aterro por não serem biodegradáveis, não é uma solução satisfatória.

Outro autor (Carvalheiras, 2016), estudou a reciclagem de resíduos de fibras de vidro em geopolímeros, argamassas e telas de impermeabilização, desenvolvendo o trabalho entre a Universidade de Aveiro, Ria Blades, S.A. e Saint-Gobain Weber Portugal, S.A. com o intuito de encontrar formas de aproveitamento dos resíduos de fibra de vidro produzidos na Ria Blades, S.A., que atualmente são depositados em aterro. Na integração em argamassas bastardas, o objetivo foi compreender o efeito da substituição das fibras poliméricas atualmente usadas, pelas fibras de vidro residuais. Estudou-se o efeito na percentagem de ar incorporado e na densidade do amassado, bem como a variação de massa e de dimensão, módulo de elasticidade, resistência à compressão e flexão do produto endurecido. A incorporação de fibra de vidro não prejudicou o desempenho das argamassas, sendo os resultados semelhantes aos das amostras padrão. Apesar das quantidades incorporadas serem apenas de 0,1%, é possível que a utilização destes resíduos tenha impactos economicamente

positivos para as duas empresas. Concluiu-se que a reciclagem de resíduos de fibra de vidro foi positiva em diferentes produtos, minimizando as quantidades a depositar em aterro e contribuindo para melhorar o desempenho ambiental da empresa Ria Blades, S.A., que produz pás para geradores eólicos. Nas argamassas a incorporação de fibra de vidro não ostenta prejudicar o seu desempenho, sendo semelhante ao de amostras produzidas com outros reforços fibrosos (poliméricos). Sendo as quantidades incorporadas nesta aplicação relativamente modestas, a reciclagem dos resíduos de fibras pode mesmo assim ter impacto económico positivo nas duas empresas. Por um lado, minimizam-se os custos de aquisição de material de reforço fibroso e, por outro lado, na empresa geradora do resíduo pode conseguir-se escoar material a menor custo do que a deposição em aterro, acrescentando aos benefícios ambientais.

Linhares (Linhares, 2011) estudou a incorporação de ligantes minerais em argamassas-cola. Pretendeu caracterizar e avaliar o comportamento dos cimentos associados à produção de argamassas em Portugal, de forma a averiguar a sua influência nas variações das propriedades das argamassas. Foi avaliado o papel de pozolanas artificiais como complemento ao ligante primário em argamassas-cola de base cementícia, uma vez que o elevado teor de cimento, fundamental para conferir a resistência mecânica, pode originar uma maior retração e, conseqüentemente, maior tendência para a fendilhação, causando limitações ao nível da resistência do material imerso e de deformabilidade. A incorporação de materiais pozolânicos foi realizada em argamassas do tipo C2S1 e C2S2, numa lógica de substituição parcial do cimento e avaliação de resultados do comportamento em pasta, da aderência por tração perpendicular e da determinação da deformação transversal. Atestou-se que os cimentos apresentam variações significativas nas suas propriedades, particularmente ao nível do calor de hidratação, o que reforça a necessidade de alguma adaptabilidade para o uso em argamassas-cola. A introdução de pozolanas artificiais como complemento do cimento revelou-se um método mais eficaz, quer pelas propriedades das argamassas-cola não serem comprometidas, quer pelas pozolanas serem mais sustentáveis a nível ambiental.

Lopes (Lopes, 2010) estudou o potencial da aplicação de escórias provenientes da incineração de resíduos sólidos urbanos como agregados em argamassas e betões ou em pavimentação rodoviária. Concluiu que o estado final das escórias depende de fatores inerentes ao processo e também depende de fatores externos, nomeadamente das condições

meteorológicas e outras condições adversas, tais como a sazonalidade dos resíduos. Isto obriga a uma monitorização mais regular das características para que a sua aplicação seja viável. Em relação à aplicação em argamassas, este material apresentou bom comportamento no que diz respeito à resistência à compressão e à flexão. Por outro lado, a adição de escórias provocou um aumento acentuado do tempo de início de presa. Isto obriga a que a substituição dos agregados por escórias seja feita em quantidades reduzidas (<15%) e a necessidade de ser efetuada uma crivagem para que a granulometria seja idêntica à do agregado a substituir. Este passo torna evidentemente o processo mais caro.

Conclui-se assim, neste capítulo, que valorizando os resíduos provenientes de vários materiais, consegue-se dar uma nova vida/ finalidade sem estes terem de ir para aterros ou para o lixo. E, por conseguinte, poderão substituir os agregados naturais preservando-os, pois estes têm sido escassos.

Criando assim, uma economia circular e também uma construção mais sustentável.

3 Metodologia Experimental

Neste capítulo, pretende-se explicitar o que foi feito para estudar a incorporação de três resíduos em materiais de construção, nomeadamente, em argamassas de reboco e betonilhas. Deste modo, durante este estudo, prepararam-se diversas formulações de argamassas e betonilhas de referência, determinaram-se as suas propriedades físicas e mecânicas fundamentais, para além da caracterização básica de matérias primas e resíduos a serem incorporados nos materiais referidos. Os resíduos estudados foram dois da indústria siderúrgica (resíduo ASIC e um resíduo refratário) e ainda um outro, um resíduo britado de construção e demolição. A caracterização das formulações às quais estes agregados foram adicionados foi realizada no seu estado fresco e endurecido.

3.1 Materiais e Formulações de Argamassas de reboco e Betonilhas em estudo

Neste estudo pretendeu-se estudar e analisar a incorporação de três resíduos ASIC, Refratário e Resíduo Britado Mesclado em argamassas e betonilhas.

O objetivo do trabalho incidiu sobre argamassas de reboco e em betonilhas para pisos radiantes. Nas argamassas de reboco efetuou-se a substituição parcial da areia, um agregado natural, por estes resíduos. Nas betonilhas, usadas para pisos radiantes, procedeu-se à adição de resíduos para substituir agregados naturais, procurando-se também ver se se conseguia em alguma das formulações uma melhoria da condutibilidade térmica devido à sua aplicação.

3.2 Caracterização de resíduos

3.2.1 Resíduo ASIC

O resíduo ASIC (*Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção*) foi fornecido por uma empresa (Harsco Environmental) pertencente ao grupo americano HARSCO que opera nas instalações fabris da Siderurgia Nacional da Maia e do Seixal, tratando dos resíduos siderúrgicos. Este resíduo é um subproduto do fabrico do aço, e que após o seu acondicionamento, triagem, lavagem e britagem, torna-se num agregado artificial denso com algumas vantagens em relação aos agregados naturais, segundo (HARSCO ENVIRONMENTAL, 2019):

- Possui uma maior resistência e durabilidade do que a pedra;

- Possui uma maior resistência ao escorregamento por possuir faces angulares;
- Após a compactação, solidifica como o betão;
- É um produto com boas características.

É um resíduo que está certificado com a marca CE segundo a norma EN 13242, e foi atestado em como pode ser usado como um agregado em materiais de construção (HARSCO ENVIRONMENTAL, 2019).

Este resíduo pode ter várias aplicações, tais como o uso em, segundo (HARSCO ENVIRONMENTAL, 2019):

- Camadas de base e sub-base;
- Leito de pavimento e aterros em vias rodoviárias;
- Camadas de aterro;
- Camada de coroamento e sub-balastro em vias ferroviárias;
- Camadas de drenagem;
- Acessos;
- Parques de máquinas;
- Pisos de estaleiros de obras de construção.

Estudos laboratoriais, (A. G. Correia et al., 2007) e (HARSCO ENVIRONMENTAL, 2019), foram realizados envolvendo a caracterização das propriedades químicas, mineralógicas, geométricas, físicas e mecânicas de amostras do agregado ASIC, recolhidas nas instalações da Siderurgia Nacional quer no Seixal, quer na Maia, em que mostraram que:

- Este agregado é um inerte de acordo com os valores constantes do anexo I, do Decreto-Lei 152/2002, de 23 de maio e com a EN 13242;
- É um material bem graduado, com dimensão 0/40, e possui granulometria extensa;
- É também um material com uma massa volúmica seca na ordem de 3,10-3,71 Mg/m³;
- Possui uma absorção de água na ordem de 0,9-3,8%;
- É uma matéria de boa resistência à fragmentação e ao desgaste, com um valor de Los Angeles na ordem dos 25%.



a) Resíduo ASIC antes da análise granulométrica



b) Resíduo ASIC após análise granulométrica

Figura 5 Resíduo ASIC e diferentes granulometrias

3.2.2 Resíduo Refratário

A amostra de resíduo refratário da Siderurgia Nacional (Maia) utilizada neste trabalho é um resíduo utilizado nos fornos industriais, especialmente, nas indústrias siderúrgicas para o tratamento e fabrico de aços e ferros fundidos. Os tijolos refratários são colocados no interior das paredes dos fornos, funcionando como um revestimento protetor, submetidos a altas temperaturas, variações térmicas, ações mecânicas, químicas, sendo necessário que garantam a longa duração do revestimento, mas sofrendo de desgaste com o tempo o que exige a sua substituição periódica, resultando assim os resíduos refratários em causa (Sako & Pandolfelli, 2014).

Estes resíduos refratários são materiais cerâmicos que têm uma boa resistência mecânica, resistência ao calor e ao choque térmico. São constituídos neste caso por misturas de óxidos de elevado ponto de fusão, como por exemplo, a SiO_2 , Al_2O_3 , MgO e outros componentes menores. Existem normas onde se referem as condições para que se possa considerar que os materiais são refratários como as recomendações da Federação Europeia dos Fabricantes de Produtos Refratários (PRE), da International Standard Organization (ISO) e da British Standard (BS). Em geral, um material para ser considerado refratário deverá manter a sua forma e constituição até uma temperatura mínima de 1450°C , dependendo a sua temperatura de utilização da sua composição, havendo refratários para um leque distinto de temperaturas. Este refratário é considerado um refratário básico por possuir magnésio, dolomite e espinela na sua constituição. Estes materiais podem ser combinados com carbono e grafite e utilizados em ambientes onde existem condições básicas agressivas. Os materiais básicos, normalmente, são usados em processos de maior temperatura ($1750\text{--}1850^\circ\text{C}$), maior

refratariedade, comparativamente às restantes classes refratárias, mas são mais suscetíveis à hidratação pelo que o seu processamento requer alguns cuidados (Sako & Pandolfelli, 2014) (Sadik et al., 2014) (Fang et al., 1999).



a) Resíduo refratário antes da análise granulométrica b) Resíduo refratário após análise granulométrica

Figura 6 Resíduo refratário e diferentes granulometrias

3.2.3 Resíduo de construção e demolição britado

A amostra de resíduos de construção e demolição utilizada neste trabalho foi fornecida por uma empresa portuguesa com sede na Figueira da Foz. A RCD- Resíduos de Construção e Demolição, S.A. é uma unidade industrial que ostenta grande interesse sobre os problemas associados à gestão de resíduos, especialmente os resíduos produzidos no setor da construção civil (obras públicas e privadas), garantindo o cumprimento do Decreto-Lei nº46/2008 de 12 de março. A unidade industrial da RCD SA pretende atingir diariamente as metas ambientais (EU), protegendo e preservando o ambiente e os recursos naturais, valorizando resíduos e reduzindo emissões de carbono, bem como contribuir para o desenvolvimento económico e ambiental sustentável (RCD- Resíduos de Construção e Demolição SA, 2014).

O processo de valorização dos RCD's realizado por esta unidade industrial, consiste no seguinte:

- Primeiramente, ocorre a recolha do material no local da obra;
- Depois da receção do material nas suas instalações industriais, ocorre a classificação e a pré-seleção do mesmo. A pré-seleção do material consiste na separação dos resíduos por tipologias, ou seja, pedras, betuminosos, terra, tijolos, plásticos, metais, entre outros;

- Após a pré-seleção do material, procede-se à triagem mecânica e manual dos resíduos. A triagem e o processamento mecânico, englobam tapetes rolantes e maquinaria diversa como os trituradores, separadores magnéticos para materiais ferrosos, separadores de vibração ou separadores a ar para resíduos de menores dimensões. A triagem manual consiste numa última vistoria de extração de resíduos que não foram eliminados aquando da triagem mecânica sendo esta realizada por pessoal especializado;
- Após a triagem, o material é encaminhado para as trituradoras, para a obtenção de um novo material reciclado, e por fim é armazenado e depois transportado para o cliente.

Como se pode ver na figura 7, o processo de valorização dos RCD's é muito simples.

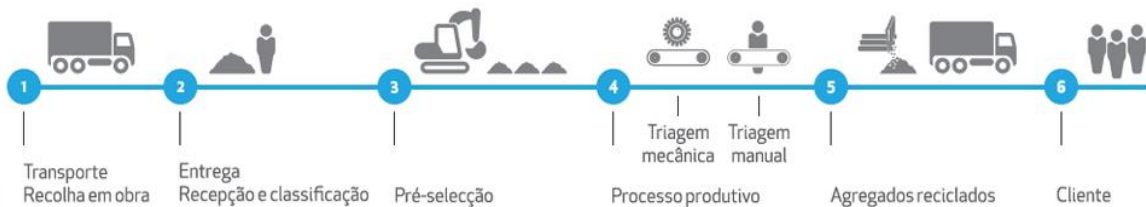


Figura 7 Processamento dos RCD's (RCD- Resíduos de Construção e Demolição SA, 2014)

Esta unidade industrial, possui tecnologia moderna e avançada capaz de valorizar cerca de 90% dos resíduos de construção e demolição. Com isto, a RCD- Resíduos de Construção e Demolição, S.A., produz agregados reciclados de RCD de diferentes granulometrias (figura 8), reutilizando e otimizando o seu transporte e evitando assim o retorno em vazio dos camiões.



Figura 8 Agregados recuperados de granulometria fina (0-10mm) (RCD- Resíduos de Construção e Demolição SA, 2014)

Nas tabela 1 e 2 encontram-se descritas características e vantagens dos resíduos em estudo.

Tabela 1 Resumo das características e vantagens dos resíduos em estudo (HARSCO ENVIRONMENTAL, 2019) (Sako & Pandolfelli, 2014) (RCD- Resíduos de Construção e Demolição SA, 2014)




Resíduos	Caraterísticas e Vantagens
<p>ASIC</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Possui uma maior resistência e durabilidade do que a pedra; • Possui uma maior resistência ao escorregamento por possuir faces angulares; • Após a compactação, solidifica como o betão; • É um material bem graduado, com dimensão 0/40, e possui granulometria extensa; • É também um material com uma massa volúmica seca na ordem de 3,10-3,71 Mg/m³; • Possui uma absorção de água na ordem de 0,9-3,8%; • É uma matéria de boa resistência à fragmentação e ao desgaste, com um valor de Los Angeles na ordem dos 25%.
<p>Refratário</p> 	<p>Estes resíduos refratários são materiais cerâmicos que têm uma boa resistência mecânica, resistência ao calor e ao choque térmico. São constituídos neste caso por misturas de óxidos de elevado ponto de fusão, como por exemplo, a SiO₂, Al₂O₃, MgO e outros componentes menores.</p>

Tabela 2 Resumo das características e vantagens dos resíduos em estudo (HARSCO ENVIRONMENTAL, 2019) (Sako & Pandolfelli, 2014) (RCD- Resíduos de Construção e Demolição SA, 2014) - continuação

Resíduos	Caraterísticas e Vantagens
Britado Mesclado (RCD) 	Resíduos provenientes de obras de construção, reconstrução, ampliação, alteração, conservação e demolição de edificações. Composto essencialmente por: Betão, Produtos de betão, Argamassa, Blocos de alvenaria de betão, Agregados soltos, Pedra natural, Agregados hidráulicos soltos, Tijolos e telhas de argila, Betão autoclavado não flutuante, Argila, Solo, Metais ferrosos e não ferrosos, Madeira não flutuante, Plástico, Borracha, Gesso Cartonado e Vidro.

3.2.4 Análise granulométrica

De acordo com a norma EN 1015-1: *Methods of test for mortar for masonry – Part 1: Determination of particle size distribution (by sieve analysis)* (CEN (Comité Européen de Normalisation), 1998b) e com a norma NP EN 933-1: *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados Parte 1: Análise granulométrica Método de peneiração* (IPQ (Instituto Português da Qualidade), 2000), estes métodos consistem em delimitar a forma de determinar a distribuição granulométrica de uma certa matéria-prima ou argamassa.

Os equipamentos a utilizar são uma balança de precisão 0,1g e um jogo de peneiros, e também um pincel e uma escova para remover facilmente o material sem danificar os peneiros.

(Nota: De acordo com a norma NP EN 933-2:1999: *Ensaio para a determinação das características geométricas dos agregados - Parte 2: Determinação da distribuição granulométrica: Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas* (IPQ (Instituto Português da Qualidade), 1999), deve-se utilizar única e exclusivamente peneiros de malha quadrada, e que estejam em conformidade com a ISO 3310-2 e a ISO 3310-1.)



Figura 9 Equipamentos para análise da distribuição granulométrica

Descrição do método experimental:

1. Pesar entre 100g a 600g da amostra seca a analisar e colocá-la no peneiro superior do conjunto de peneiros;
2. Peneirar durante aproximadamente 5/10 minutos manualmente ou recorrendo ao vibrador de peneiros;
3. Colocar um recipiente retangular em cima da balança de modo a que se possa colocar as diferentes granulometrias bem distribuídas para uma melhor perceção do tamanho das partículas;
4. Tarar a balança;
5. Remover o produto com cuidado, do peneiro, com o auxílio de um pincel e de uma escova de modo a retirar as partículas que se agregam, principalmente, nos peneiros de malha fina, de modo a não danificar a malha;
6. Repetir os pontos 4 e 5 para todos os peneiros;
7. Após estes passos, limpar os equipamentos e colocá-los no respetivo lugar, para posterior uso.

Na figura 10 poderá ser visualizado as diferentes granulometrias após o procedimento acima descrito.



Figura 10 Distribuição granulométrica dos resíduos em estudo

Com as percentagens do material retido em cada peneiro, poder-se-á construir uma curva granulométrica acumulada, em que os valores são determinados, considerando 100% para o peneiro de maior abertura da malha e para os restantes peneiros, determinando-se assim a diferença entre a % do material acumulado no peneiro de maior abertura da malha e a % do material retido no peneiro que se encontra a ser analisado.

As figuras 11 e 12 representam, respetivamente, as curvas granulométricas da areia e dos resíduos em estudo (ASIC, Resíduo Refratário e Resíduo Britado Mesclado).

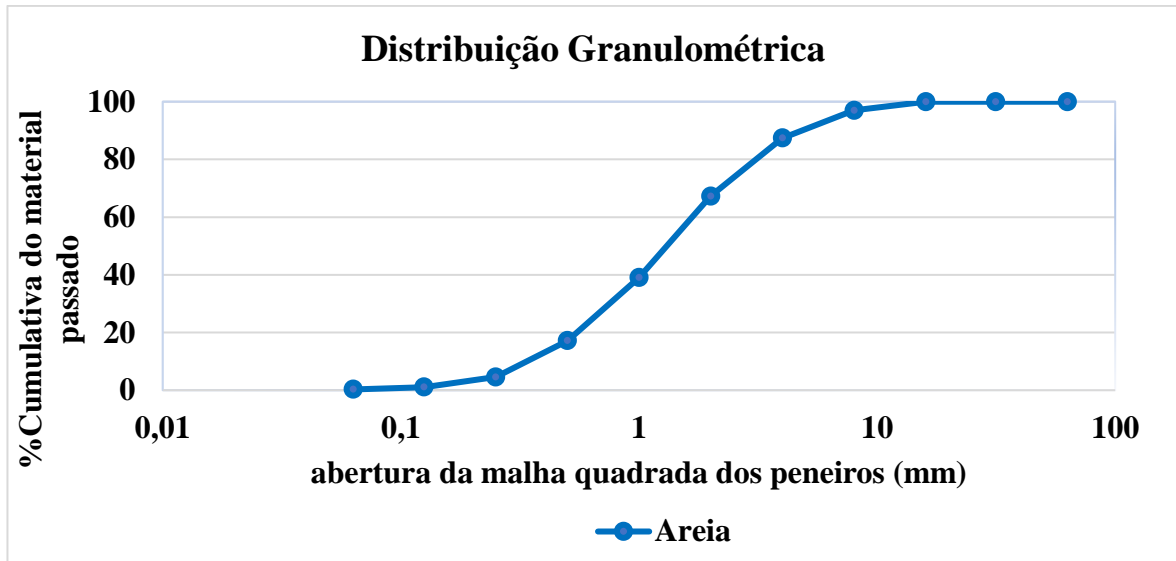


Figura 11 Análise granulométrica da Areia

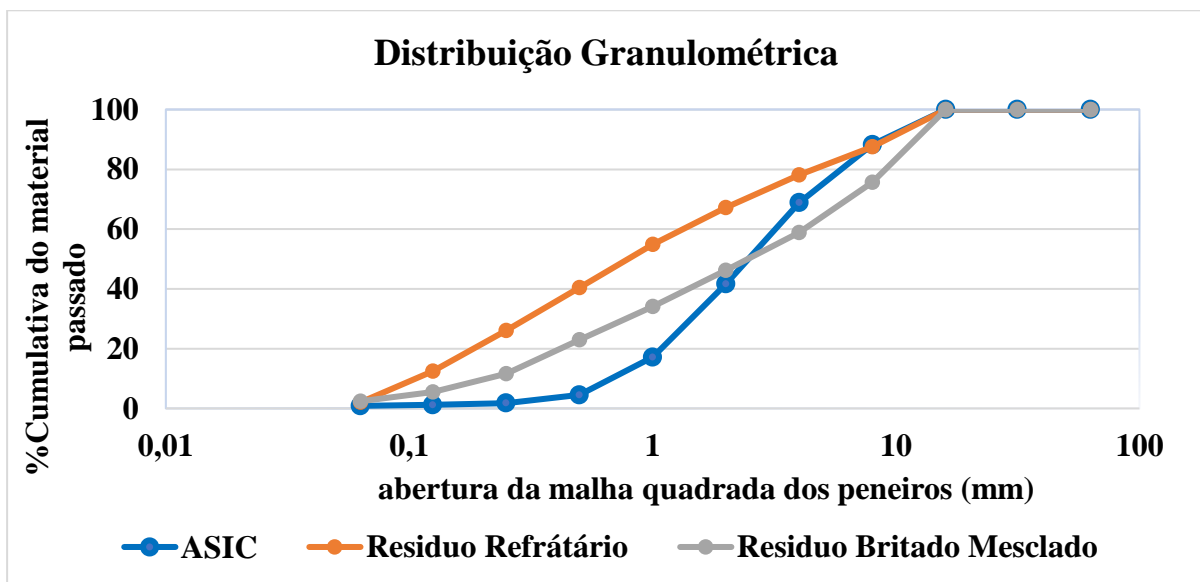


Figura 12 Curva granulométrica dos resíduos em estudo: ASIC, Resíduo Refratário e Resíduo Britado Mesclado

Através da análise granulométrica efetuada a cada um dos agregados, pode-se concluir que a curva granulométrica dos resíduos em estudo que mais se aproxima da curva granulométrica da areia é a curva granulométrica do resíduo ASIC. Continuando a análise destas curvas granulométricas, verifica-se que o resíduo refratário é o resíduo que apresenta uma granulometria mais fina. Já o resíduo britado mesclado é um resíduo intermédio, nem muito fino nem muito grosso. No entanto, estes resultados são meramente informativos pois

o comportamento destes materiais irá ser avaliado nos ensaios de resistência para ver qual o resíduo que mais se aproxima à areia.

O resíduo ASIC também foi caracterizados em termos de distribuição granulométrica, por uma análise de difração a laser, realizada no equipamento de Análise Coulter LS230. O cálculo do tamanho da partícula é baseado nos modelos de Fraunhofer, de Mie e PIDS. As medidas são efetuadas com a amostra dispersa em água. O intervalo de medida desta análise é entre $0,04\mu\text{m}$ e $2000\mu\text{m}$. Esta técnica da análise por difração a laser é amplamente utilizada na determinação do tamanho de partículas através da medição da variação angular na intensidade da luz difundida à medida que um feixe de laser interage com as partículas dispersas da amostra (ISO 13320, 2009).

A amostra do resíduo ASIC foi desagregada num almofariz antes da realização do ensaio. Realizou-se um corte em que as partículas abaixo do peneiro de $63\mu\text{m}$ foram utilizadas como amostra do ensaio. Na figura 13 mostra-se a análise granulométrica obtida pelo ensaio de Coulter para o resíduo ASIC. Não se realizou este ensaio para o resíduo refratário e para o resíduo britado mesclado, pois são incluídos na forma de partículas superiores a $63\mu\text{m}$.

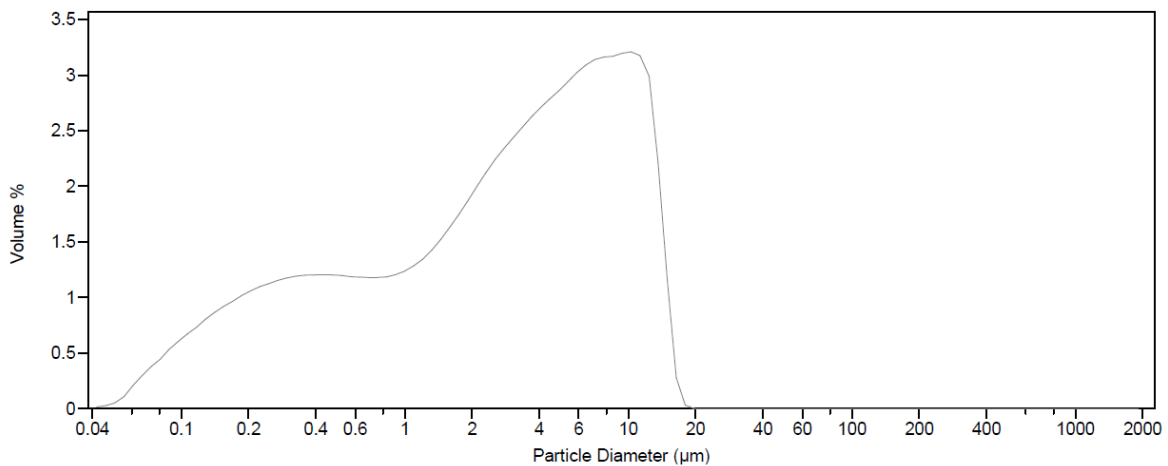


Figura 13 Distribuição granulométrica do resíduo ASIC

3.2.5 Determinação da Área Superficial Específica (BET)

Baseado na Teoria de Adsorção Multicelular, o método de BET engloba a adsorção física de moléculas de gás sobre uma superfície sólida e também desempenha a função como base para uma técnica de análise importante para a medição de área superficial específica de um material com porosidade aberta diferenciada. Desde que foi promulgado, este método de

BET tem sido a ferramenta de interpretação principal e mais vantajosa no campo da adsorção física de gases. (Maxim S.; et al., 2017). Este método apenas foi utilizado para o resíduo ASIC. Os resultados obtidos para este resíduo encontram-se na tabela 3.

Tabela 3 Valor de área superficial específica do resíduo ASIC

Resíduo	BET_{N2} (m²/g)
ASIC	2,169±0,019

3.2.6 Análises térmicas (ATD/TG)

Na caracterização dos diferentes resíduos, realizaram-se dois tipos de análises térmicas: diferencial (ATD) e gravimétrica (ATG).

A análise térmica diferencial (ATD) indica a variação da temperatura da amostra devido a reações exotérmicas (com libertação de calor) e/ou endotérmicas (com absorção de calor), de um material inerte de referência.

Já a análise térmica gravimétrica (ATG) indica a alteração da massa da amostra durante o aquecimento. O ensaio das análises térmicas e gravimétricas foi realizado numa balança termogravimétrica Setsys Evolution 1750 em modo TG-DSC (sensor tipo S) da Setaram, preparado para a análise simultânea ATD/TG, com uma temperatura de 1000°C e uma taxa de aquecimento de 10°C/minuto. (El-Sayed & Mostafa, 2014)

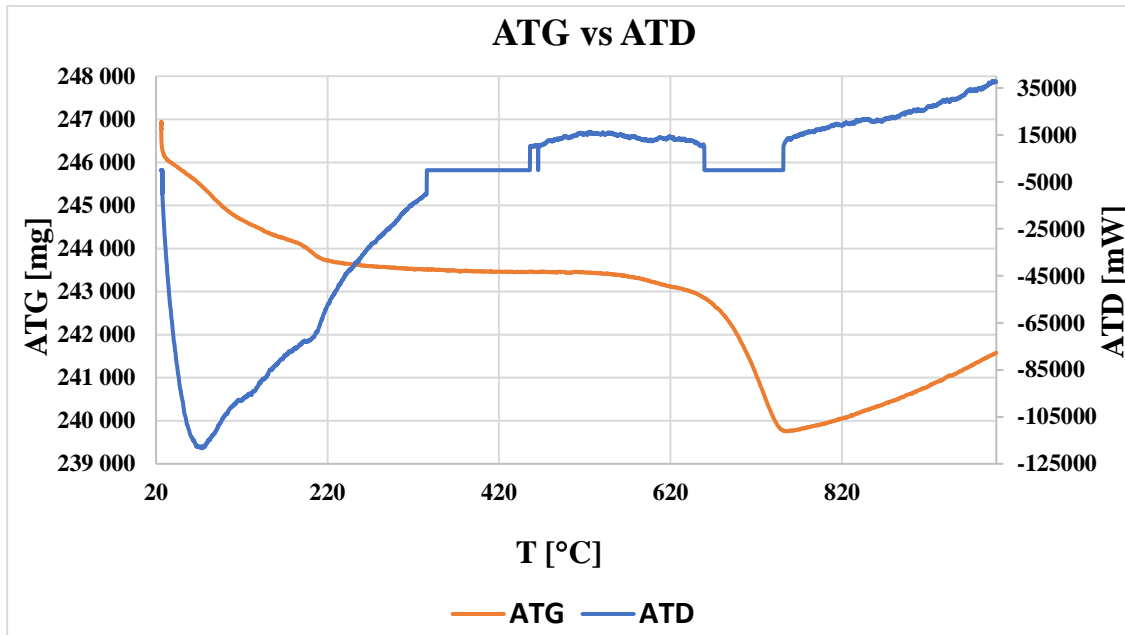


Figura 14 Análise térmica diferencial e gravimétrica do resíduo ASIC

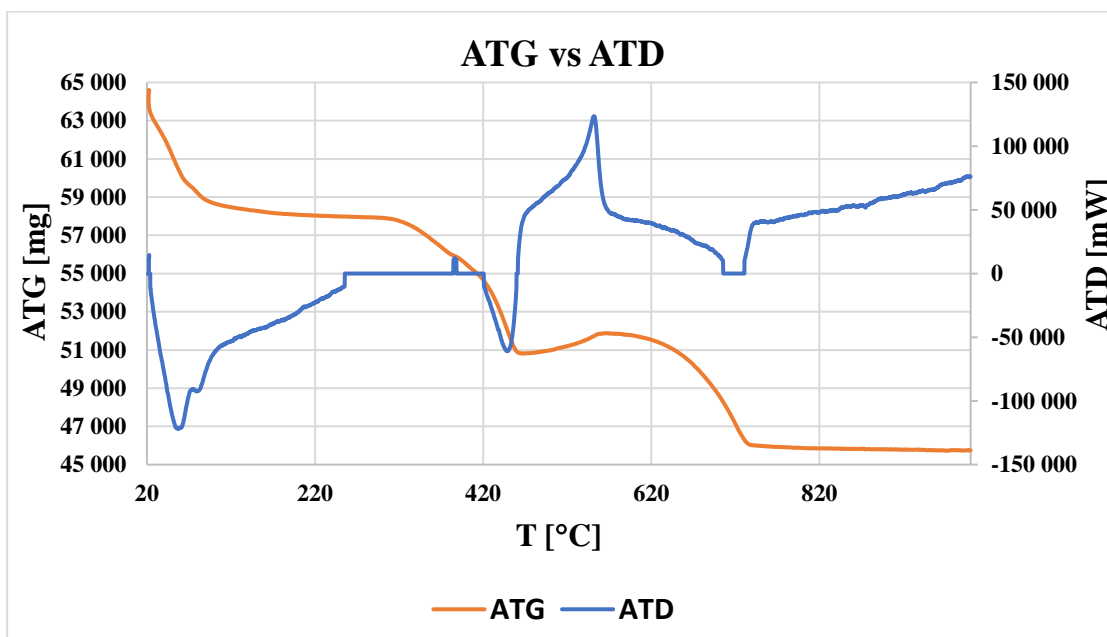


Figura 15 Análise térmica diferencial e gravimétrica do resíduo Refratário

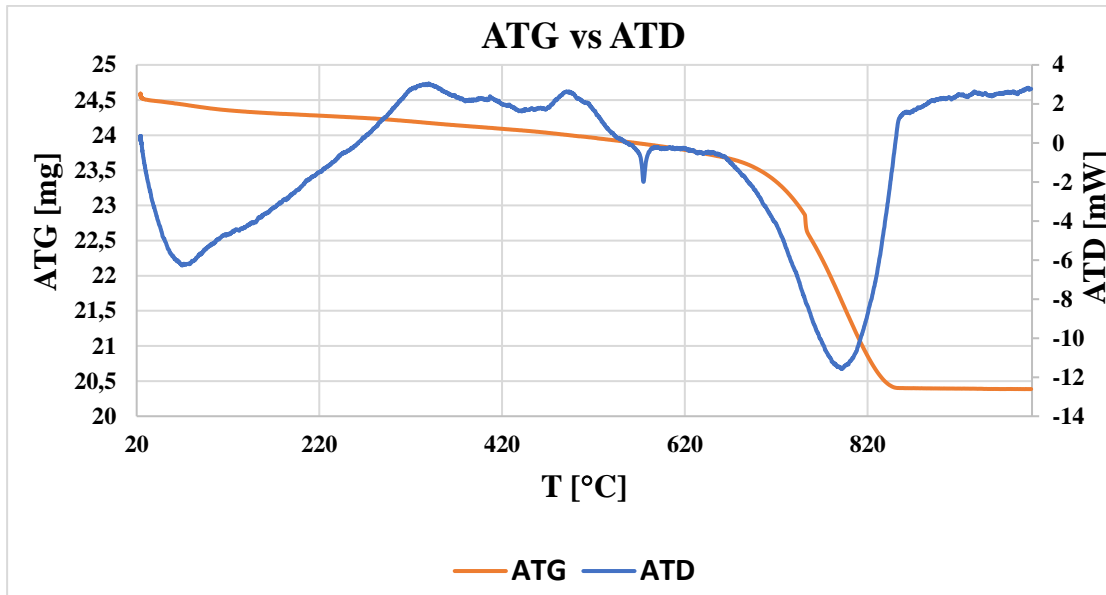


Figura 16 Análise térmica diferencial e gravimétrica do Resíduo Britado Mesclado

As figuras 14, 15 e 16 representam respetivamente a análise diferencial e gravimétrica dos resíduos ASIC, Refratário e do RCD Britado Mesclado.

Observando os resultados obtidos nas figuras 14 a 16, pode-se verificar que a perda de massa entre os 20°C e os 200°C nos 3 resíduos se deve à perda de humidade presente e que antes dos 800°C se dá a maior perda de massa também nos 3 resíduos que deve a reações de descarbonatação. No resíduo refratário (fig.15) verifica-se ainda uma perda de massa até aos 400°C que se deve provavelmente à decomposição de matéria orgânica.

3.2.7 Determinação da massa volúmica dos resíduos em estudo

Procedeu-se à determinação da massa volúmica dos agregados através do método do picnómetro para partículas de agregado de dimensão entre 0,063 mm e 4 mm, seguindo a norma *NP EN 1097-6: 2003 – Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água* (IPQ (Instituto Português da Qualidade), 2003). Para a determinação das massas volúmicas das partículas, utilizou-se a seguinte fórmula:

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad , \left[\frac{g}{dm^3} \right]$$

Equação 1 Massa Volúmica das Partículas

Em que:

ρ_a é a massa volúmica do material impermeável das partículas;




ρ_w é a massa volúmica da água (Mg/m^3);

M_2 é a massa do picnómetro contendo o provete de agregado saturado, em gramas;

M_3 é a massa do picnómetro apenas cheio de água, em gramas;

M_4 é a massa no ar do provete seco em estufa, em gramas.

Tabela 4 Determinação da densidade dos resíduos em estudo

Resíduo	Massa volúmica do material impermeável das partículas [g/dm^3]
ASIC 	$\rho_a = 3,50 \text{ g/dm}^3$
Refratário 	$\rho_a = 2,68 \text{ g/dm}^3$
Resíduo Britado Mesclado 	$\rho_a = 2,60 \text{ g/dm}^3$

Em relação à determinação das massas volúmicas dos resíduos, pode-se concluir que o resíduo ASIC é o mais denso dos resíduos, possuindo uma densidade de $3,50 \text{ g/cm}^3$. O resíduo Refratário possui uma densidade de $2,68 \text{ g/cm}^3$, e o resíduo Britado Mesclado possui uma densidade de $2,60 \text{ g/cm}^3$. A areia que foi utilizada para a formulação das amostras,

sendo alvo de substituição por parte dos resíduos para estudar o desempenho das formulações, apresenta uma densidade da areia de Salgueiro de $\rho_a = 2,64g/cm^3$ (Manuel dos Santos, 2013). Os valores de dois dos três resíduos aproximam-se muito ao da areia, sendo o que se aproxima mais o resíduo RCD Britado Mesclado.

3.3 Caracterização e formulação das argamassas e betonilhas em estudo

Como foi referido anteriormente, o objetivo deste trabalho é desenvolver argamassas e betonilhas com incorporação de resíduos substituindo matérias primas naturais, e que possuam características semelhantes às argamassas e betonilhas base já existentes.

Primeiramente, procedeu-se então à caracterização das matérias-primas para depois se prepararem as formulações das argamassas e betonilhas. Por fim, estudaram-se estas formulações de argamassas onde, a areia foi parcialmente substituída e nas betonilhas (fornecidas pela empresa Saint Gobain Portugal) onde foram adicionados sobre a formulação base os resíduos referidos. As argamassas e betonilhas foram estudadas em termos da sua resistência à compressão e do eventual aparecimento de sais ao longo do tempo quando estas são imersas em soluções de sulfatos. O cimento usado nas argamassas foi o Cimento Portland 32,5N CEMII BL 32,5N (CIMPOR). As argamassas e betonilhas estudadas encontram-se descritas e de forma clara, nas tabelas 5 e 6.

Tabela 5 Descrição das argamassas estudadas e respetiva composição

Denominação	Designação	Composição (%)			
		Cimento	Agregados	Resíduos	Água
Argamassa de referência (1:4)	A	20%	80%	0%	12,5%
Argamassa com resíduo ASIC	AA	20%	60%	20%	12,5%
Argamassa com resíduo refratário	AR	20%	60%	20%	13,5%
Argamassa com RCD britado mesclado	ARBM	20%	60%	20%	14%

Tabela 6 Descrição das betonilhas estudadas e respetiva composição

Denominação	Designação	Composição (%)			
		Cimento	Agregados	Resíduos	Água
Betonilha base de referência	BR	15%	85%	0%	14%
Betonilha com resíduo ASIC	BRA	12,5%	70%	17,5%	12,5%
Betonilha com resíduo refratário	BRR	12,5%	70%	17,5%	16%
Betonilha S1 com resíduo ASIC*	BSA*	15%	65%	20%	14%
Betonilha S1 com resíduo ASIC	BSA	15%	65%	20%	12,5%
Betonilha S1 com resíduo ASIC	BSA'	15%	65%	20%	12%
Betonilha S2 com resíduo ASIC	BSA2	15%	65%	20%	12,5%
Betonilha S2 com resíduo refratário	BSRR2	15%	65%	20%	17,5%
Betonilha S2 com resíduo britado mesclado (RCD)	BSRBM2	15%	65%	20%	16%

Ao contrário das primeiras formulações onde se adicionaram resíduos (BRA e BRR), as formulações de betonilha S1 e S2 a formulação base já vinha sem o agregado que se ia substituir pelos resíduos, pelo que a sua formulação é diferente da do primeiro grupo, mas mais semelhante à da betonilha de referência em termos do teor de cimento e agregados.

Os valores de percentagem de água que constam nas tabelas 5 e 6, já são os valores finais necessários para as composições. Após o ensaio do espalhamento é que se chegou aos valores finais da água, mas foram colocados nas tabelas 5 e 6 para poder saber a quantidade de cada componente nas composições das formulações.

3.4 Preparação e caracterização dos produtos no estado fresco

Neste ponto, procedeu-se então à preparação para avaliação da incorporação dos resíduos em estudo nas misturas de argamassas e de betonilhas, de modo a efetuar, em primeiro lugar, a avaliação das alterações causadas no estado fresco das misturas pelo método do espalhamento.

Começou-se então por fazer os cálculos e as pesagens dos materiais considerando um traço de 1:4 para as argamassas feitas em laboratório e usando para as betonilhas a base composicional fornecida pela empresa parceira.

No recipiente da misturadora colocou-se então os materiais sólidos e, com a ajuda de uma espátula começou-se por fazer o envolvimento dos materiais até obter uma mistura homogénea. Adicionou-se inicialmente 10% de água e fez-se a mistura manualmente com a ajuda de uma espátula. O objetivo, neste caso, foi ir adicionando água até se obter uma pasta não muito presa (sem aderir à espátula) mas também não muito fluída (sem escorrer).

Efetuuou-se assim a amassadura já no equipamento próprio, primeiro em velocidade lenta, deixando homogeneizar durante 15 segundos, depois com a ajuda de uma espátula raspou-se a pasta que ficou nas paredes laterais do recipiente para de seguida se misturar mais 75 segundos na velocidade mais rápida da misturadora, seguindo a norma *EN1015-2:1998 – Methods of test for mortar for masonry – Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars* (CEN (Comité Européen de Normalisation), 1998a).



a) Materiais sólidos



b) Amassadora Automática

Figura 17 Equipamentos e utensílios para a amassadura

Após a fase da mistura das argamassas, e para avaliar a argamassa em termos de trabalhabilidade através da fluidez, utilizou-se como referido a mesa de espalhamento (figura 18). O método de espalhamento é utilizado em argamassas frescas, sendo o espalhamento uma medida de fluidez de uma argamassa fresca e avaliando a sua trabalhabilidade (Paiva, 2005). Os ensaios foram feitos de acordo com a norma *EN1015-3:1998 – Methods of test for mortar for masonry – Part3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*(CEN (Comité Européen de Normalisation), 1998c).

O objetivo foi tentar manter o espalhamento nas argamassas e betonilhas, para serem utilizadas para o mesmo fim, mas fazendo variar o teor de água por causa da incorporação dos resíduos, uma vez que há resíduos que absorvem mais água do que outros.

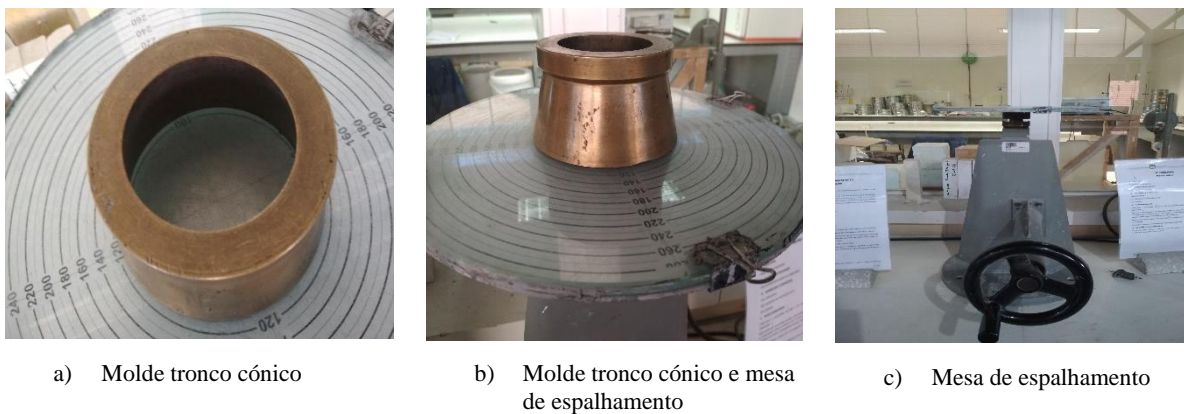


Figura 18 Mesa de espalhamento e molde tronco cónico

Após ter o mesmo espalhamento para diferentes teores de água adicionada às diferentes misturas de argamassas e betonilhas, concluiu-se então a fase final de misturar cada uma das misturas na misturadora. De seguida, colocou-se cada uma das misturas feitas em moldes de provetes com dimensões de $160 \times 40 \times 40 \text{mm}^3$, de acordo com (Nepomuceno & Silva, 2014).

Antes das misturas serem colocadas nos moldes de provetes de ferro, estes foram oleados para que ao fim de 24h os provetes fossem descofrados sem problemas.

Após desmoldagem dos provetes, estes foram identificados e iniciou-se o processo de cura a dois tempos (28 e 90 dias), numa câmara climática a uma temperatura de $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $95\% \pm 5\%$. Após a cura, realizaram-se os ensaios com as argamassas/betonilhas no estado endurecido.

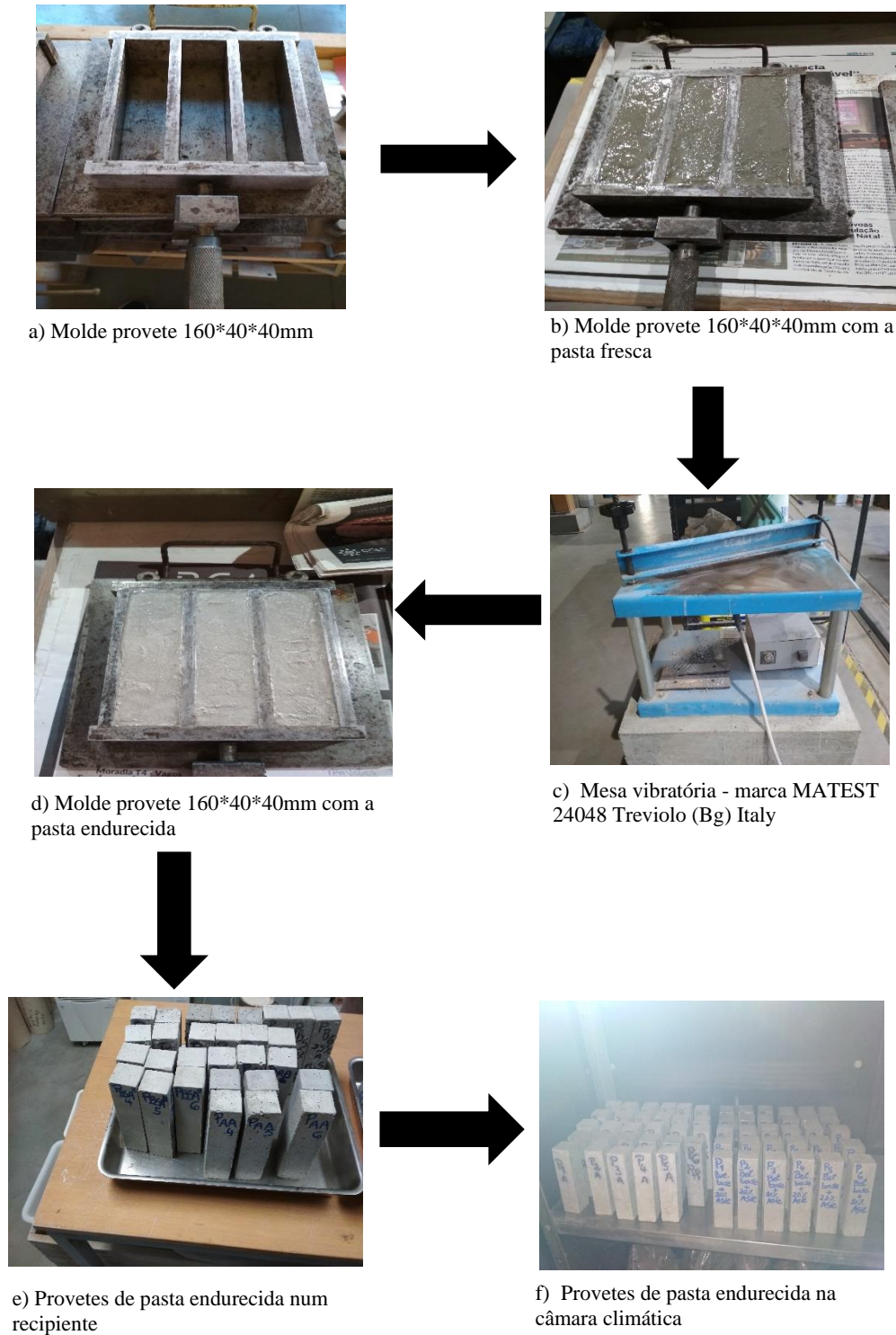


Figura 19 Esquema figurativo do processo de endurecimento da pasta até ao processo de tempo de cura

3.5 Caracterização dos produtos no estado endurecido

Este estudo consistiu na execução de diversos ensaios a partir dos provetes com dimensões de $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ provenientes da mistura com os resíduos em estudo.

Por exemplo, a norma *EN998-1: Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar* (CEN (Comité Européen de Normalisation), 2003) estabelece algumas propriedades para os produtos endurecidos, (tabela 6).

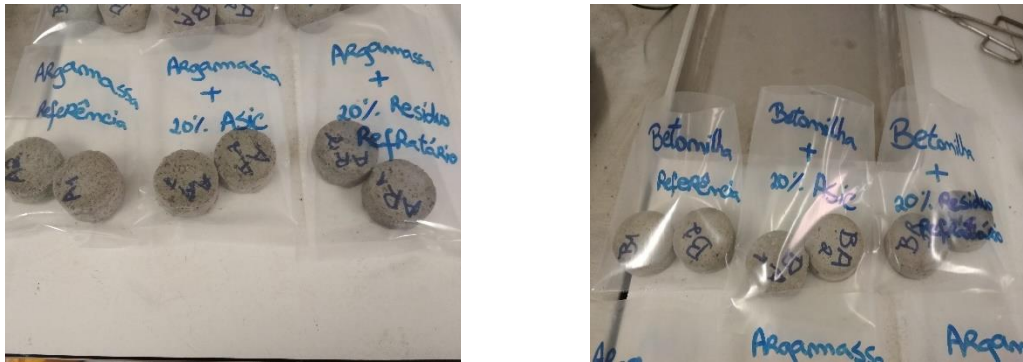
Tabela 7 Classificação para as propriedades do produto endurecido, adaptado de (CEN (Comité Européen de Normalisation), 2003)

Propriedades	Categorias	Valores
Resistência à compressão em 28 dias	CS I	0,4 a 2,5 N/mm ²
	CS II	1,5 a 5,0 N/mm ²
	CS III	3,5 a 7,5 N/mm ²
	CS IV	$\geq 6 \text{ N/mm}^2$
Absorção de água por capilaridade	W 0	Não especificado
	W 1	$c \leq 0,40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$
	W 2	$c \leq 0,20 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$
Condutibilidade Térmica	T 1	$\leq 0,1 \text{ W/m.K}$
	T 2	$\leq 0,2 \text{ W/m.K}$

Foram realizados ao todo 78 provetes (6 provetes para cada tipo de mistura de argamassa/betonilha), tendo sido estes provetes colocados previamente em cura numa câmara climatizada sob condições de temperatura de $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ e de humidade relativa de $95\% \pm 5\%$. Metade dos provetes foram submetidos a um tempo de cura de 28 dias e a outra metade foi submetida a um tempo de cura de 90 dias, após o qual se realizaram os mesmos ensaios.

3.5.1 Determinação da condutibilidade térmica

Foram realizados ensaios de condutibilidade térmica a algumas amostras que exigiu uma preparação de provetes com diferente forma, forma essa de “bolacha” com diâmetro de 5 cm (50 mm) e espessura de 1,5 cm (15 mm). (figura 20).



a) Amostras de argamassas

b) Amostras de betonilhas

Figura 20 Amostras para testar a condutibilidade térmica

Segundo (Ricklefs et al., 2017) a condutibilidade térmica quantifica a capacidade dos materiais de transportar calor e é dependente da massa volúmica dos materiais. As microestruturas que possuem materiais de alta condutibilidade térmica transportam energia térmica mais rapidamente do que microestruturas análogas que possuem materiais de baixa condutividade térmica. Estes ensaios foram feitos em equipamento próprio, nos laboratórios do Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro (CTCV) em Coimbra, seguindo a norma *ASTM C-518-91* e *E-1530-93*, em que a amostra e um transdutor de fluxo de calor (HFT) são colocados entre duas placas a temperaturas distintas de forma a gerar um fluxo de calor.

Essa montagem é isolada termicamente e preservada a uma temperatura intermédia de forma a minimizar a dissipação de calor na espessura da amostra. As temperaturas das superfícies que estão em contacto com a amostra, são medidas através de termopares e o calor medido pelo HFT. Segundo a lei de Fourier, o calor medido é proporcional à resistência térmica da amostra e nas interfaces com os pratos (Almeida & Ferreira, 2016).

3.5.2 Determinação da massa volúmica das amostras

Em relação a este ensaio, para a determinação da massa volúmica das amostras tanto aos 28 dias como aos 90 dias, foi usado a seguinte fórmula:

$$\rho = \frac{M}{V}, \quad \left[\frac{g}{dm^3} \right]$$

Equação 2 Massa Volúmica da Amostra

Em que:

ρ é a massa volúmica da amostra

M é a massa em gramas da amostra

V é o volume da amostra em dm^3

Para todas as amostras, o volume é sempre o mesmo $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$, o peso das amostras é que varia, logo a densidade das amostras também irá variar.



Figura 21 Amostras utilizadas na determinação da massa volúmica

3.5.3 Determinação do módulo de elasticidade

Para a determinação do módulo de elasticidade das amostras tanto aos 28 dias como aos 90 dias, o aparelho utilizado foi o PUNDIT (figura 22). Segundo (Miranda et al., 2013) este aparelho permite determinar a velocidade de propagação ultrassónica através de materiais sólidos elásticos, medindo-se o tempo de transmissão através do material. O módulo de elasticidade pode ser calculado através da fórmula seguinte:

$$E_d = \rho \cdot v^2 \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}, [MPa]$$

Equação 3 Determinação do Módulo de Elasticidade

Em que:

E_d é o módulo de elasticidade (MPa);

ρ é a densidade de massa no estado endurecido da argamassa (kg/m^3);

v é a velocidade que a propagação da onda ultrassônica através do material no sentido longitudinal (em km/s).

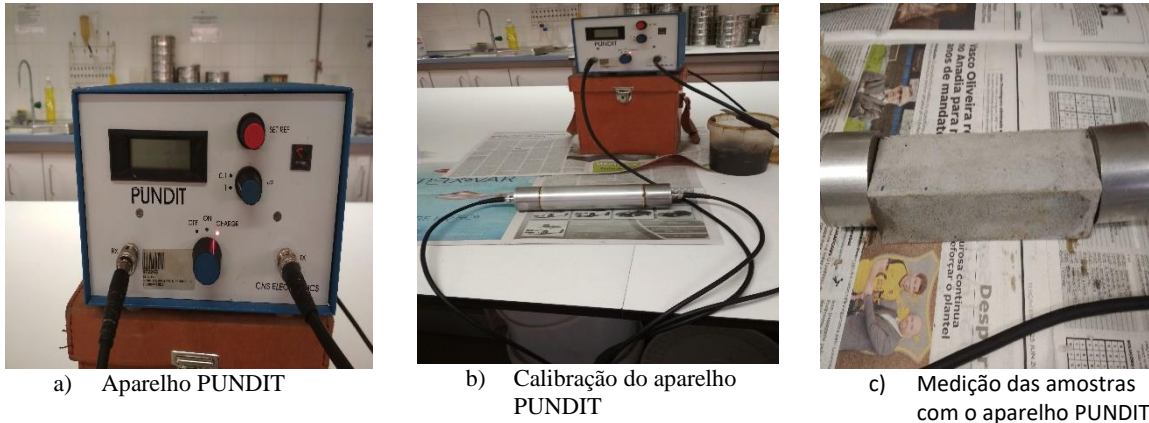


Figura 22 Aparelho PUNDIT e amostra

3.5.4 Determinação da resistência mecânica à compressão e à flexão

De acordo com (Gulbe et al., 2017) a resistência mecânica à flexão pode ser determinada através de ensaios de carga em três pontos de amostras prismáticas. A resistência à compressão da argamassa foi determinada numa das duas partes resultantes do teste de resistência à flexão.

Segundo a norma EN1015-11: Methods of test for mortar for masonry – Part 11 – Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar (CEN (Comité Européen de Normalisation), 1999) para a determinação da resistência à flexão, deve-se testar as amostras ao fim de 28 dias ou mais após desmoldagem.

Para o cálculo da resistência à flexão, f , em N/mm^2 usou-se a seguinte equação:

$$f = 1,5 \times \frac{Fl}{bd^2} , [N/mm^2]$$

Equação 4 Resistência à Flexão

Em que:

F é a carga máxima aplicada à amostra, em Newtons (N);

l é a distância entre os eixos dos rolos de suporte, em milímetros (mm);

b é a largura da amostra em milímetros (mm);

d é a profundidade da amostra em milímetros (mm).

Para a determinação da resistência à compressão, testaram-se as amostras ao fim de 28 dias ou mais após desmoldagem.

A figura 23 mostra algumas imagens de amostras que foram submetidas aos ensaios e a máquina utilizada para este tipo de ensaio.



a) Amostras em câmara climática antes dos ensaios à flexão e à compressão



b) Amostras em câmara climática após os ensaios de flexão e compressão



c) Amostras de argamassa de referência e com resíduo refratário após ensaios de flexão e de compressão



d) Equipamento para ensaio de flexão e compressão com a amostra



e) Amostra após ensaio de compressão



f) Amostra após ensaio de compressão vista ao pormenor

Figura 23 Materiais e equipamentos para os ensaios à resistência à flexão e à resistência à compressão

3.5.5 Ensaios de Capilaridade

Uma das patologias mais frequentes no edifício é a presença de humidade que afeta negativamente o conforto e a saúde dos utilizadores, prejudicando o estado do edifício. O estudo do comportamento de materiais em relação à absorção de água pode ajudar a prevenir e diagnosticar presença de humidade capilar no edifício. De acordo com a norma *EN 1015-18: Methods of test for mortar for masonry – Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar* (CEN (Comité Européen de Normalisation), 2002) e com (Morón et al., 2019), o coeficiente de absorção de água devido à ação capilar é medido usando amostras prismáticas de argamassa à pressão atmosférica. Após a secagem até massa constante, uma face da amostra é imersa em 5 a 10 mm de água por um determinado período de tempo e o aumento da massa é determinado. O ensaio da capilaridade foi feito segundo os procedimentos da norma *EN 1015-18: Methods of test for mortar for masonry – Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar* (CEN (Comité Européen de Normalisation), 2002).

Antes de iniciar este ensaio, colocaram-se as amostras a secar até massa constante, numa estufa ventilada, a uma temperatura de $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Após a obtenção da massa constante, retiraram-se as amostras da estufa de secagem para se realizar os ensaios. Para o cálculo do coeficiente da capilaridade, usou-se a seguinte fórmula:

$$C = 0,1 \times (M2 - M1), \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}} \right]$$

Equação 5 Coeficiente da Capilaridade

Em que:

C é o coeficiente de absorção de água para uma amostra de argamassa individual, $[\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})]$;

$M1$ é a massa da amostra após imersão por 10 min, (g);

$M2$ é a massa da amostra após imersão por 90 min, (g).

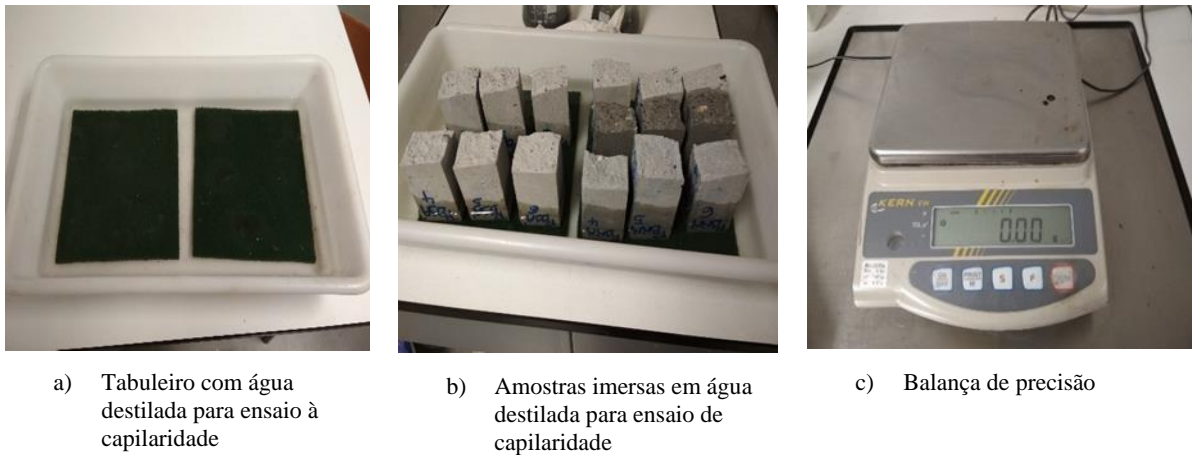


Figura 24 Amostras imersas e materiais e equipamentos utilizados para o ensaio à capilaridade

3.5.6 Avaliação de eflorescências e criptoflorescências

As eflorescências são depósitos de sais cristalinos de cor branca que surgem à superfície dos revestimentos como pisos, paredes ou tetos, resultando da migração e evaporação de soluções aquosas salinizadas (C. Correia, 2005) e (Tuna, 2011). Este tipo de depósitos nas argamassas, nas alvenarias ou nas placas cerâmicas, resulta do transporte dos sais solúveis pela água utilizada na construção, na limpeza ou através de infiltrações por intermédio dos poros dos elementos de revestimento. É de notar que os materiais cerâmicos e as argamassas possuem vazios no seu interior (poros) e, por isso, a água pode passar para o seu interior por capilaridade. Nesse caso, quando a cristalização ocorre no interior do elemento, este fenómeno denomina-se por criptoflorescências.

Para a determinação de existência de sais (cloretos) nas amostras de argamassas e betonilhas, realizaram-se alguns ensaios de acordo com procedimentos para a avaliação da resistência aos ataques de sais de cloretos (0,01 e 0,1M) e sais de sulfatos (0,01 e 0,1M).

As amostras de argamassas e betonilhas foram submetidas a dois tipos de soluções, uma de sulfato de sódio e outra de sulfato de zinco.

Procedeu-se a diferentes procedimentos para cada tipo de solução de sulfatos, pois a solução de sulfato de sódio reage mais depressa em contacto com os materiais com diferentes propriedades químicas, do que a solução de sulfato de zinco. A solução de sulfato de sódio, é uma solução que atua mais depressa, fazendo com que o material se degrade mais depressa, e também resultando alguns cloretos dessa desintegração.

Para a avaliação do efeito de cloretos com a solução de sulfato de zinco, o procedimento envolveu as seguintes etapas:

1ªEtapa: Colocar as amostras em imersão durante 24h. depois retirar e medir - (m0)

2ªEtapa: Colocar as amostras em estufa a 70°C até massa constante - (m1)

Após atingir massa constante iniciar os ciclos:

1. Colocar as amostras durante 12h em recipiente fechado com uma solução saturada de sulfato de zinco (90% HR)

Após as 12h em solução, retirar as amostras e pesar – (m2)

2. Retirar as amostras do recipiente e deixar durante 12h a 22°C e 55%HR na câmara climatizada

Retirar as amostras da câmara climatizada e pesar – (m3)

Repetir os ciclos 1 e 2 durante 50 ciclos. Durante este ciclo, ir avaliando o aparecimento dos sais existentes e registrando sempre a massa das amostras, pois com este procedimento, à medida que o tempo avança, as amostras vão perdendo massa significativa.

Para a avaliação do efeito de cloretos com a solução de sulfato de sódio, o procedimento envolveu as seguintes etapas:

Pesar as amostras inicialmente – mi

Após pesagem, iniciar ciclos:

1. Colocar as amostras em imersão em solução saturada de Na₂SO₄ durante 2h

Após as 2h em solução, retirar as amostras e pesar - m0

2. Colocar as amostras em estufa a 70°C durante a noite

Retirar as amostras da estufa, deixar arrefecer e pesar – m1

Repetir os ciclos 1 e 2. Durante estes ciclos, ir avaliando o aparecimento de sais existentes e registrando sempre a massa das amostras, pois com este procedimento, e devido ao tipo de solução, as amostras vão perdendo bastante massa.

Para o aparecimento de existência ou não de alguns sais, neste caso, também foram colocadas as amostras imersas apenas em água destilada.

Pesar as amostras inicialmente – mi

Após pesado mi, iniciar ciclos:

1. Colocar as amostras em imersão em solução de água destilada à temperatura ambiente durante ± 12h

1.1. Após as 12h, retirar as amostras e pesar – Mhúmida

2. Colocar as amostras em estufa a 80°C durante $\pm 12h$

2.1. Retirar as amostras da estufa, deixar arrefecer e pesar – Mseca

Repetir os ciclos 1 e 2. Durante estes ciclos, ir avaliando o aparecimento de sais existentes e registando sempre a massa das amostras, pois com este procedimento, as amostras vão perdendo massa significativa.

Em todos os ciclos das várias soluções preparadas para os ensaios, foram-se verificando o aparecimento ou não nas amostras, mas também foi-se verificando a perda de massa e também ao mesmo tempo a degradação de algumas amostras, que principalmente em contacto com a solução de sulfato de sódio iam-se degradando.

Para a realização destes ensaios, então procedeu-se à preparação das soluções indicadas nos procedimentos.

Para a solução de sulfato de zinco, recorreu-se à ficha do produto (Sheet, 2019), e preparou-se a solução de acordo com as normas de segurança.

Estimou-se o volume necessário de solução para 13 amostras, com esse volume calculou-se a quantidade necessária de sulfato de zinco sólido (figura 25) para 2 litros de solução. Para os 2 litros de solução juntou-se 1930g de sulfato de zinco com 2 litros de água destilada num balão volumétrico. Após a solução estar devidamente dissolvida, colocou-se no recipiente para o devido ensaio.

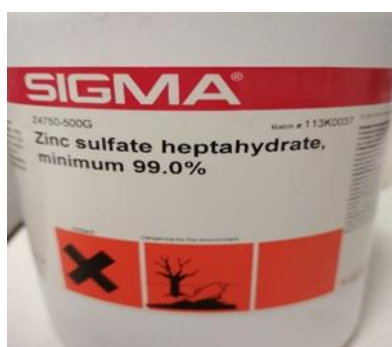


Figura 25 Rótulo da embalagem de sulfato de zinco



Figura 26 Medidor de pH



Figura 27 Recipiente da água destilada



Figura 28 Balança de precisão

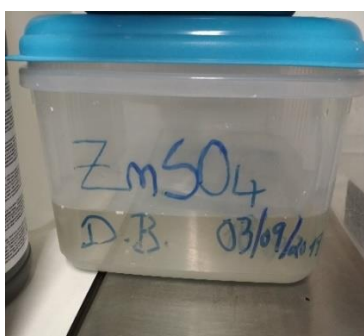


Figura 29 Solução de sulfato de zinco

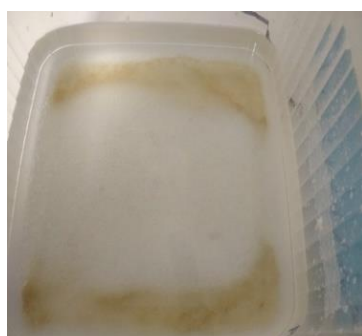


Figura 30 Solução de sulfato de zinco após o ensaio



Figura 31 Recipiente vazio para colocar a solução de sulfato de zinco utilizado

Para a solução de sulfato de sódio, recorreu-se à ficha do produto (CHEMICALS, 2017), e preparou-se a solução de acordo com as normas de segurança.

Estimou-se o volume necessário de solução para 13 amostras, com esse volume calculou-se a quantidade necessária de sulfato de sódio sólido (figura 32) para 2 litros de solução. Para os 2 litros de solução juntou-se 400g de sulfato de sódio com 2 litros de água destilada num balão volumétrico. Após a solução estar devidamente dissolvida, colocou-se no recipiente para o devido ensaio.

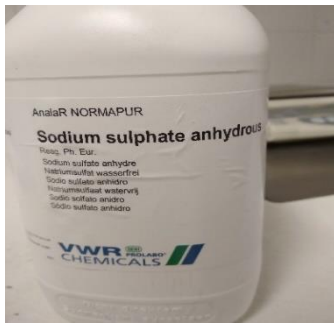


Figura 32 Rótulo da embalagem do sulfato de sódio

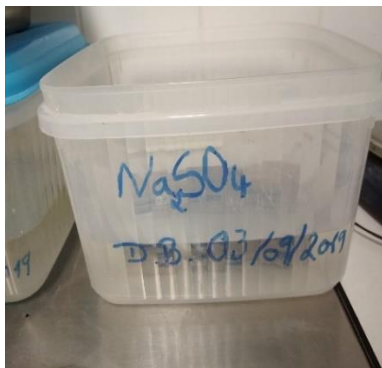


Figura 33 Solução de sulfato de sódio



Figura 34 Solução de sulfato de sódio após o ensaio



Figura 35 Solução de água destilada antes do ensaio



Figura 36 Solução de água destilada após o ensaio

Antes de cada ensaio, realizou-se a verificação do pH de cada solução através do medidor de pH, e no fim de cada ensaio também se realizou a verificação do pH de cada solução. Isto porque com as amostras imersas nas soluções, elas libertam sedimentos, sedimentos esses que possuem sais, o que pode acidificar ou alcalinizar as soluções no final de todo o processo.

4 Apresentação e Discussão dos resultados

4.1 Efeito da incorporação de resíduos no estado fresco das argamassas e betonilhas

Na avaliação através do método do espalhamento, neste estudo começou-se por admitir um traço em peso 1:4 de argamassa, considerando para este tipo de argamassa um espalhamento entre 120 mm e 140 mm. Desenvolveu-se a argamassa de referência para ver qual o espalhamento que se iria estabelecer para todas as outras argamassas. Para tal, para uma capacidade de aproximadamente 3,5 kg de argamassa na misturadora, então adicionou-se inicialmente 10% de água, conseqüentemente colocou-se a argamassa na misturadora para misturar e após os 75 segundos, colocou-se a mistura no molde tronco-cônico seguindo os procedimentos.

Tabela 8 Percentagem de água e espalhamento das argamassas

Composição	Percentagem de água (%)	Espalhamento (mm)
Argamassa de referência – (A)	12,5	135
Argamassa com Resíduo Refratário – (AR)	13,5	135
Argamassa com Resíduo Britado Mesclado (RCD) – (ARBM)	14	135
Argamassa com Resíduo ASIC – (AA)	12,5	135

O espalhamento foi medido em duas direções, a primeira direção na horizontal e depois a outra perpendicular a esta, havendo sempre um erro associado. Como a água adicionada ainda não tinha atingido o objetivo do espalhamento estabelecido, adicionou-se mais um pouco de água até atingir esse patamar, o que se pode verificar na tabela 8, o valor do espalhamento foi atingido nos 135 mm, o que após realizar para a argamassa de referência, também se fez para as outras argamassas, substituindo parcialmente a areia pelos resíduos. Foram realizadas três medições até acertar no valor de espalhamento pretendido, daí ir-se adicionando água aos poucos. Apenas o valor de espalhamento final é que está representado na tabela 8. Com isto verificou-se que para a argamassa com o resíduo ASIC foi necessária a mesma percentagem de água que para a argamassa de referência, o que leva a crer que o resíduo ASIC possui o mesmo poder de absorver água que a areia, não carecendo de muita água para poder ter o mesmo tipo de fluidez de argamassa para obter uma melhor trabalhabilidade. Já a argamassa com o resíduo Refratário como a argamassa com resíduo

Britado Mesclado exigem mais água do que a argamassa de referência, para poderem ter o mesmo tipo de trabalhabilidade e o mesmo tipo de fluidez, devido à sua composição e ao seu poder de absorver água. Ou seja, estes dois resíduos absorvem muito mais água do que o resíduo ASIC, isto poderá dever-se ao facto destes dois resíduos possuírem na sua composição materiais mais secos exigindo mais água para obterem uma melhor trabalhabilidade.

Tabela 9 Percentagem de água e espalhamento das betonilhas

Composição	Percentagem de água (%)	Espalhamento (mm)
Betonilha de referência - (BR)	14	200
Betonilha com Resíduo ASIC - (BRA)	12.5	200
Betonilha com Resíduo Refratário - (BRR)	16	200
Betonilha S1 com Resíduo ASIC - (BSA*)	14	280
Betonilha S1 com Resíduo ASIC - (BSA)	12.5	200
Betonilha S1 com Resíduo ASIC - (BSA')	12	200
Betonilha S2 com Resíduo ASIC - (BSA2)	12.5	200
Betonilha S2 com Resíduo Refratário - (BSRR2)	17.5	200
Betonilha S2 com Resíduo Britado Mesclado (RCD) – (BSRBM2)	16	200

Em relação às betonilhas, realizou-se o mesmo procedimento que se fez para as argamassas. No entanto, para as betonilhas terem uma boa trabalhabilidade, o espalhamento deve situar-se à volta de 200 mm (tabela 9), pois a composição das betonilhas é ligeiramente diferente das argamassas, pois enquanto que a composição das argamassas é de água + cimento + areia, a composição das betonilhas é de água + cimento + areia + agregado grosso. Foram realizadas três medições até acertar no valor de espalhamento pretendido, daí ir-se adicionando água aos poucos. Apenas o valor de espalhamento final é que está representado na tabela 9. Por exemplo, para a betonilha de referência, é apenas necessária 14% de água para se ter um espalhamento de 200 mm e uma boa trabalhabilidade. Então, testou-se esse teor de água para a betonilha S1, mas para essa percentagem de água de 14%, o espalhamento foi de 280 mm o que fez com que fosse uma betonilha que não desse para a mesma finalidade que a betonilha de referência.

Analisando então a tabela 9, verifica-se que o resíduo ASIC tem o mesmo efeito na betonilha e na argamassa, e que nestas misturas não necessita de tanta água como os outros

resíduos para obter a mesma trabalhabilidade que a argamassa e a betonilha de referência. Já o resíduo refratário e o resíduo Britado Mesclado nas betonilhas, ocorre o mesmo processo que nas argamassas, pois necessitam de bastante percentagem de água na mistura para poderem obter o mesmo tipo de trabalhabilidade das de referência, o que sugere que estes resíduos possuem uma capacidade de absorção da água que faz com que seja necessária mais água para se poder obter uma melhor trabalhabilidade.

4.2 Efeito de resíduos nas características do estado endurecido das argamassas e betonilhas

4.2.1 Efeito na condutibilidade térmica

Após o desenvolvimento dos produtos em pasta, para proceder aos ensaios mecânicos, as 13 amostras, num total de 78 provetes, foram submetidas a cura de 28 dias e de 90 dias. As 6 amostras circulares curadas a 28 dias (figura 37) foram submetidas ao ensaio de condutibilidade térmica, cujos resultados estão na tabela 10.



Figura 37 Amostras para o ensaio de condutibilidade térmica

Pode-se verificar a esperada dependência direta da condutibilidade térmica com a massa volúmica das argamassas e betonilhas. O valor mais baixo é o da betonilha com resíduo refratário com 1,169 W/m.K, marcado pela sua baixa densidade. De facto, este resíduo é mais útil para aplicações onde se pretenda maior leveza ou características isolantes para a betonilha. Em contrapartida, a sua incorporação em argamassa não causou grande alteração o que permite continuar a ser usada como a argamassa de referência em aplicações do tipo argamassa de assentamento ou de revestimento.

Por outro lado, a argamassa e a betonilha com resíduo ASIC, com uma condutibilidade térmica de 1,946 W/m.K e de 1,975 W/m.K, respetivamente, possui uma maior condutibilidade térmica do que a argamassa ou betonilha de referência, visto que este resíduo ASIC é mais denso e um resíduo constituído essencialmente de ferro. Este aumento de condutibilidade confere a esta solução potencial interesse para usos que necessitem materiais mais densos e condutores como o caso das aplicações em pisos radiantes, para uma transmissão mais rápida do calor.

Tabela 10 Valores de condutibilidade térmica das amostras

Composição	Condutibilidade Térmica (W/m.K)	Massa volúmica aos 28 dias (g/cm³)
Argamassa de referência - (A)	1,775	2,11
Argamassa com Resíduo Refratário - (AR)	1,725	2,19
Argamassa com Resíduo ASIC - (AA)	1,946	2,28
Betonilha de referência - (BR)	1,622	2,13
Betonilha com Resíduo Refratário - (BRR)	1,169	2,04
Betonilha com Resíduo ASIC - (BRA)	1,975	2,31

4.2.2 Efeito na densidade e módulo de elasticidade

Após o tempo de cura dos provetes das amostras a 28 dias e a 90 dias, os provetes foram submetidos a ensaios mecânicos. Para tal, começou-se por determinar a densidade de cada provete de cada amostra para permitir o cálculo do seu módulo de elasticidade. Foram medidos todos os provetes para verificar se todos tinham as mesmas medidas que inicialmente tinham quando foram desmoldados dos provetes e, de seguida, foram pesados para determinar a densidade tanto aos 28 dias como aos 90 dias. Para o cálculo do módulo de elasticidade, foi usado o PUNDIT para medir a velocidade de propagação dos impulsos ultrassónicos que demoram a percorrer o material sólido, sendo necessário o valor da densidade de cada provete para o cálculo do módulo de elasticidade do material. As tabelas 11 e 12 apresentam as densidades e módulos de elasticidade das argamassas e das betonilhas, respetivamente.

Tabela 11 Densidade e Módulo de Elasticidade das Argamassas

Composição	densidade 28 dias (g/cm³)	densidade 90 dias (g/cm³)	Módulo de Elasticidade 28 dias (MPa)	Módulo de Elasticidade 90 dias (MPa)
Argamassa de referência – (A)	2,11	2,04	27,74	25,12
Argamassa com Resíduo Refratário – (AR)	2,19	2,12	27,73	26,17
Argamassa com Resíduo Britado Mesclado (RCD) – (ARBM)	2,07	2,02	22,90	22,73
Argamassa com Resíduo ASIC - (AA)	2,28	2,29	34,07	34,10

Em relação às argamassas estudadas, a que aparenta ser a argamassa mais leve devido à sua densidade é a argamassa com RCD britado mesclado (ARBM), visto que possui uma densidade de 2,07 g/cm³ aos 28 dias, mas também é a que se aproxima mais da densidade da argamassa de referência (A) pois esta possui um valor de densidade de 2,11 g/cm³ aos 28 dias. Aos 90 dias, as amostras com o passar do tempo vão perdendo peso por secagem e através da continua reação de hidratação que gera produtos que ocupam menos espaço que os reagentes envolvidos, o que torna as amostras menos densas. A argamassa com resíduo ASIC (AA) que possui uma densidade maior pelo facto de o resíduo ser mais denso. O módulo de elasticidade segue o mesmo padrão dos 28 dias para os 90 dias.

Em relação às betonilhas (tabela 12), a betonilha mais leve devido à sua densidade é a betonilha com resíduo refratário (BRR), visto que possui uma densidade de 2,04 g/cm³ aos 28 dias. É de notar que as betonilhas que verificam um aumento da densidade são as com resíduo ASIC uma vez que também é o agregado mais denso. Como já anteriormente referido, as betonilhas S1 e S2 são formulações provenientes da betonilha de referência, mas sem o agregado que se substituiu pelos resíduos.

Tabela 12 Densidade e Módulo de Elasticidade das Betonilhas

Composição	densidade 28 dias (g/cm³)	densidade 90 dias (g/cm³)	Módulo de Elasticidade 28 dias (MPa)	Módulo de Elasticidade 90 dias (MPa)
Betonilha de referência - (BR)	2,13	2,11	27,42	27,00
Betonilha com Resíduo ASIC - (BRA)	2,31	2,26	29,47	28,17
Betonilha com Resíduo Refratário - (BRR)	2,04	2,03	18,23	16,57
Betonilha S1 com Resíduo ASIC - (BSA*)	2,23	2,20	26,91	29,68
Betonilha S1 com Resíduo ASIC - (BSA)	2,29	2,22	26,13	27,58
Betonilha S1 com Resíduo ASIC - (BSA')	2,31	2,32	28,44	28,73
Betonilha S2 com Resíduo ASIC - (BSA2)	2,31	2,32	29,21	29,21
Betonilha S2 com Resíduo Refratário - (BSRR2)	2,07	2,00	19,83	18,67
Betonilha S2 com Resíduo Britado Mesclado (RCD) - (BSRBM2)	2,14	2,03	20,29	18,45

Apesar destas substituições, as betonilhas com resíduo ASIC (BRA, BSA*, BSA, BSA' e BSA2) conseguem possuir uma densidade mais elevada do que a da betonilha de referência, devido às propriedades do ASIC. As betonilhas (BSA*, BSA, BSA'), são betonilhas com a formulação S1, enquanto que a betonilha (BSA2) é uma betonilha com a formulação S2, com menos agregado do que a S1.

Os módulos de elasticidade variam em consonância com a densidade aos 28 e 90 dias. Isto não acontece com a amostra (BSA*) que apresenta 26,91 MPa aos 28 dias depois 29,68 MPa aos 90 dias. Isto pode dever-se ao facto desta amostra ter um maior teor de água na sua formulação inicial.

4.2.3 Efeito sobre a resistência mecânica à flexão e à compressão

Nas figuras 38 e 39 apresentam-se os resultados dos ensaios da resistência mecânica à flexão das amostras de argamassa e de betonilha com e sem resíduos para condições de cura a 28 e 90 dias. As figuras 40 e 41 mostram as amostras usadas nestes ensaios de flexão.

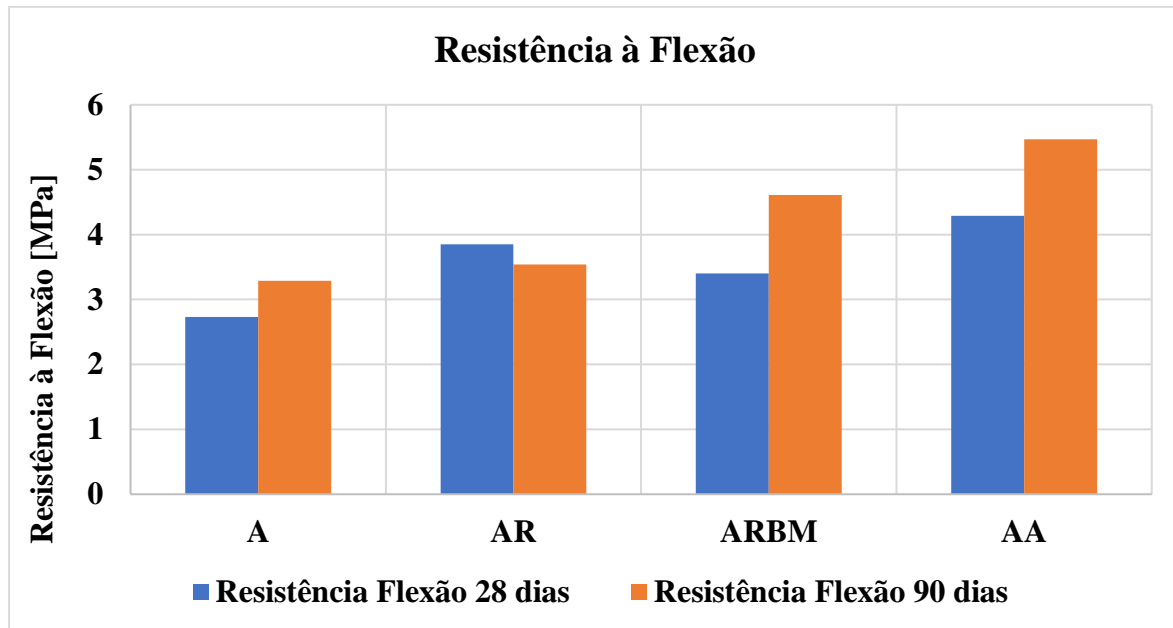


Figura 38 Resultados da Resistência à Flexão das Argamassas

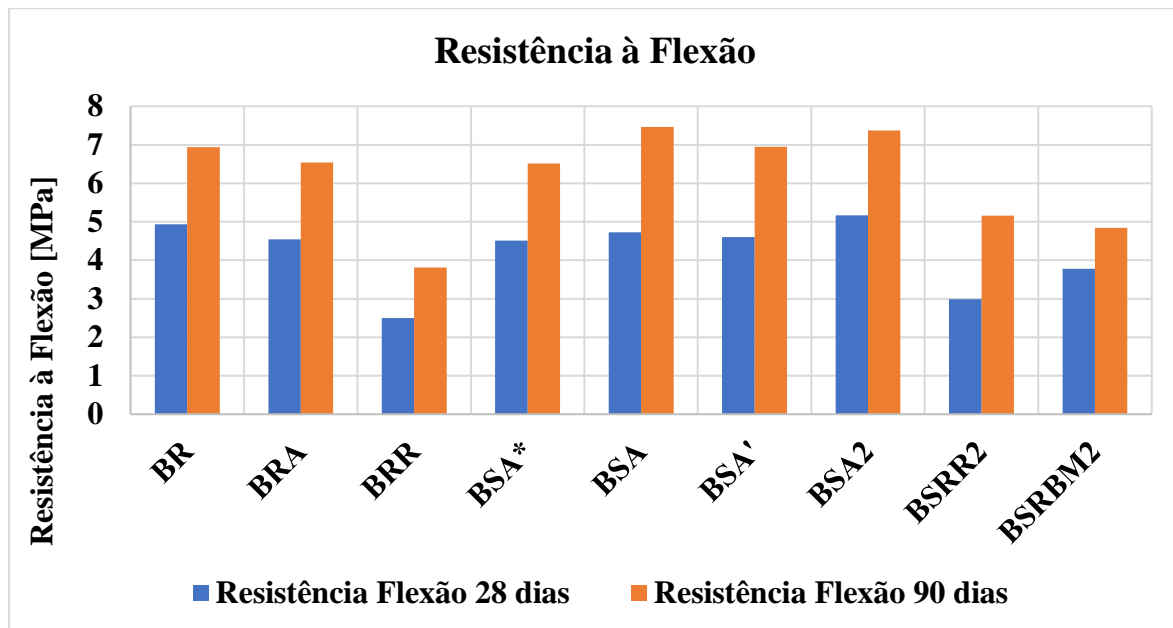


Figura 39 Resultados da Resistência à Flexão das Betonilhas



Figura 40 Amostras antes da resistência à flexão



Figura 41 Amostras após a resistência à flexão

As figuras 42 e 43 mostram os resultados dos ensaios de compressão realizadas sobre as amostras de argamassas e betonilhas em estudo (figuras 44 e 45).

Em todas as amostras de argamassas e betonilhas verificou-se um aumento da resistência mecânica à flexão e compressão com o aumento do tempo de cura de 28 para 90 dias, de acordo com o que se espera de um processo de endurecimento natural das amostras com o tempo. Apenas a argamassa com resíduo refratário (AR) apresenta à flexão um ligeiro decréscimo no valor da resistência, mas dentro da margem aceitável de erro nas medições, pois o seu valor à compressão também aumenta como o das composições com outros resíduos.

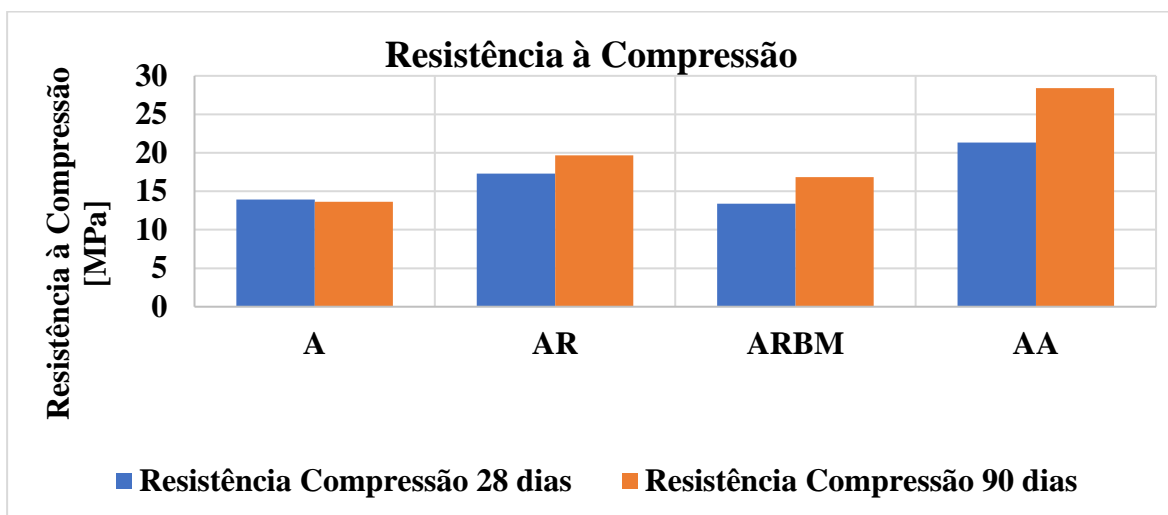


Figura 42 Resultados da Resistência à Compressão das Argamassas

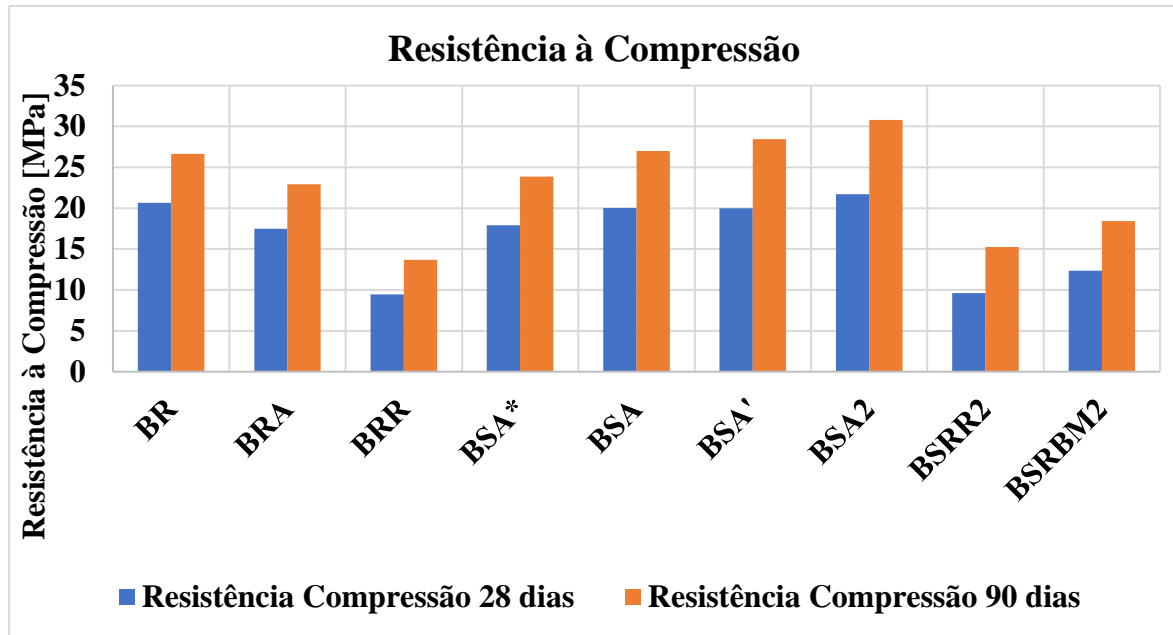


Figura 43 Resultados da Resistência à Compressão das Betonilhas



Figura 44 Amostras antes da resistência à compressão



Figura 45 Amostra após a resistência à compressão

Analisando primeiro os valores obtidos para as argamassas pode-se concluir que a introdução de qualquer dos resíduos nas formulações estudadas não prejudica a sua resistência mecânica à flexão e à compressão e, no caso do resíduo ASIC (AA), até se assiste a uma melhoria considerável devido ao seu valor de densidade superior. Do ponto de vista desta propriedade específica, pode-se afirmar que estes resíduos constituem matérias primas alternativas às naturais e que podem assim ser considerados.

No caso das betonilhas é natural a variação na resistência mecânica observada aquando da introdução dos resíduos. De facto, nas figuras 39 e 43, observa-se uma diminuição ligeira da resistência com a introdução de ASIC (BRA) e uma redução maior com a introdução do

resíduo refratário (BRR). Esta variação justifica-se pela redução em ambas as formulações com resíduos no teor relativo de cimento comparativamente à betonilha de referência (BR) pois estas adições foram efetuadas de forma suplementar à composição base (tabela 6).

Quando o teor de cimento foi mantido (nas formulações tipo S1 e S2) por se preparar uma betonilha de referência (BR) sem a parte do agregado a substituir por resíduo (tabela 6), foi possível manter o teor relativo de cimento e assim não ter a influência deste parâmetro sobre o resultado final da resistência mecânica. Verifica-se então um aumento de resistência mecânica com a introdução de ASIC, um agregado mais denso, nas betonilhas (BSA e BSA2), em relação à betonilha de referência (BR). Por outro lado, observou-se uma queda na resistência mecânica nas amostras com resíduo refratário (BSRR2) e com RCD britado (BSRBM2), principalmente devido ao facto destas formulações, para além de não serem de agregados com maior densidade como o ASIC, necessitaram de maior teor de água na formulação inicial (tabela 6) para manter a trabalhabilidade desejada, o que conduziu à redução na resistência mecânica obtida. Este excesso de água exigido para estas amostras, conduziu à redução de resistência mecânica, porque a água em excesso evaporou-se, criando poros ou vazios (Coutinho & Gonçalves, 1994).

Note-se que, em relação às betonilhas, a (BSA2) é a betonilha que tanto aos 28 dias como aos 90 dias consegue superar os valores de resistência à compressão em relação à de referência (BR). Partindo a betonilha (BSA2) de uma betonilha base sem agregado e sem parte da areia fina na composição inicial, a maior parte de agregado que se encontra neste material é o resíduo ASIC, justificando o melhor desempenho obtido por ser um agregado mais denso, o que confere o maior valor na resistência mecânica à formulação (BSA2).



Figura 46 Betonilha BSA2 aos 90 dias



Figura 47 Betonilha BRR aos 90 dias

Contudo, é preciso também assinalar, como se pode observar na figura 46, que apesar de (BSA2) ser a betonilha com uma resistência à compressão superior a todas as outras betonilhas e principalmente à de referência (BR), é uma betonilha que ao fim de 90 dias já apresenta alguma cor de ferrugem devido ao facto de possuir grande teor do resíduo ASIC, rico em ferro. Na figura 47 a betonilha com resíduo refratário (BRR) ao fim dos 90 dias, apresenta também fissuras, provavelmente devidas ao facto da amostra com resíduo refratário ter necessitado de mais água na sua formulação inicial por causa da trabalhabilidade.

4.2.4 Efeito dos resíduos sobre a capilaridade

Após os ensaios à resistência à flexão e à compressão, as amostras foram colocadas numa câmara climatizada com uma temperatura de 20°C e à humidade relativa de 65% durante 24 horas. Antes de se iniciar o ensaio da capilaridade, colocaram-se a secar até massa constante, numa estufa ventilada à temperatura de 60°C ± 5°C todas as amostras. Nas figuras 48 a 51 apresentam-se os ensaios à capilaridade das amostras curadas a 28 e 90 dias.

As amostras de argamassas que apresentaram uma grande capacidade de absorção de água aos 28 dias, ou seja, que possuem um maior coeficiente de capilaridade foram a (ARBM) e a (AA), ou seja as que contém RCD britado mesclado e resíduo ASIC, respetivamente. É de notar ainda pelas figuras 48 e 49 que o tempo de cura afetou a microestrutura de tal forma que mudou o coeficiente de capilaridade das argamassas relativamente umas às outras. Esta mudança no posicionamento relativo da capilaridade tem apenas a haver com as alterações na microestrutura ao longo do processo de endurecimento das argamassas durante a cura, nomeadamente no que concerne às alterações no teor de porosidade capilar (10^{-2} a 10 μm), segundo (Coutinho & Gonçalves, 1994). O excesso de água na amassadura, em relação à necessária para a hidratação, permanece livre após as operações de fabrico, colocação e compactação, e ao sair por evaporação deixa vazios no seu lugar. Portanto, a formação de poros ou vazios deve-se sempre ou quase sempre à granulometria dos inertes e à compactação, presa e cura (Coutinho & Gonçalves, 1994). Sendo a porosidade, a relação entre o volume de vazios e o volume total, aparente, do material. A porosidade absoluta, geralmente, não se pode medir sem destruir o material devido a nem todos os vazios estarem acessíveis, daí não se ter realizado este ensaio.

Para se medir a porosidade simples ou absorção, teria que, segundo (Coutinho & Gonçalves, 1994):

- Mergulhar na água, parcial e lentamente, o provete até ficar todo submerso nas primeiras 24 horas, expulsando o ar todo que tenha;
- Durante outras 24 horas, depois de submerso, pesar e secar a massa constante, por exemplo a 105°C;
- O quociente da diferença entre as massas após a embebição e depois de secar, resulta a porosidade simples.
- A embebição poderá ser intensa, se após a imersão à temperatura ambiente a água for mantida em ebulição a 100°C, durante um determinado intervalo de tempo.

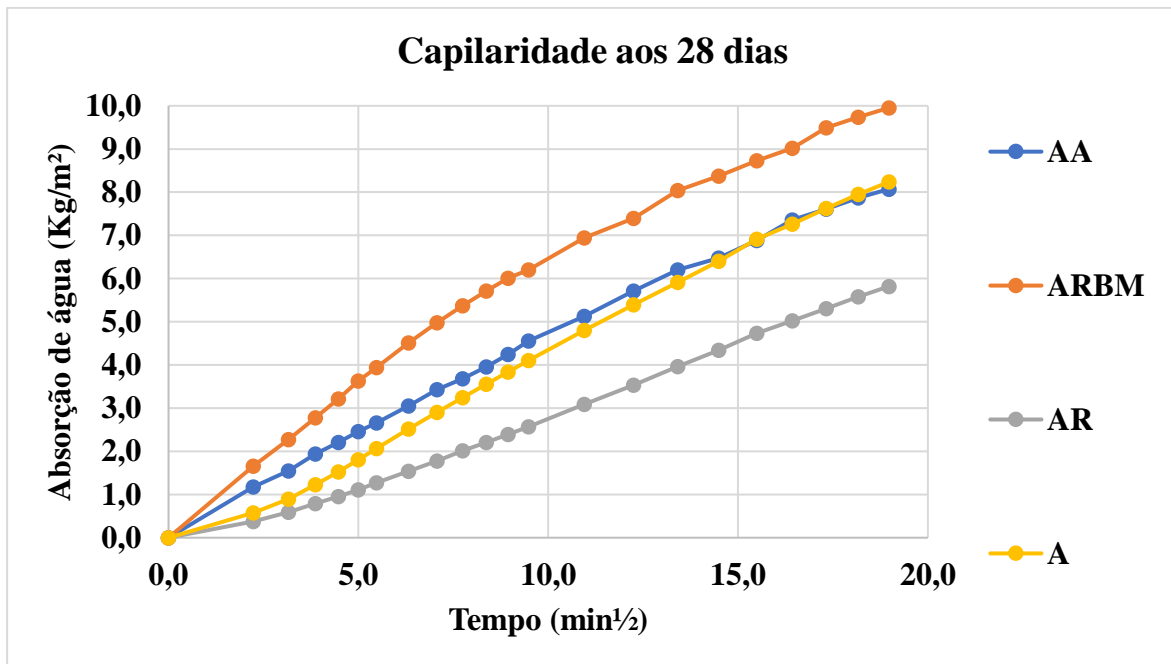


Figura 48 Resultados dos coeficientes de capilaridade das argamassas curadas a 28 dias

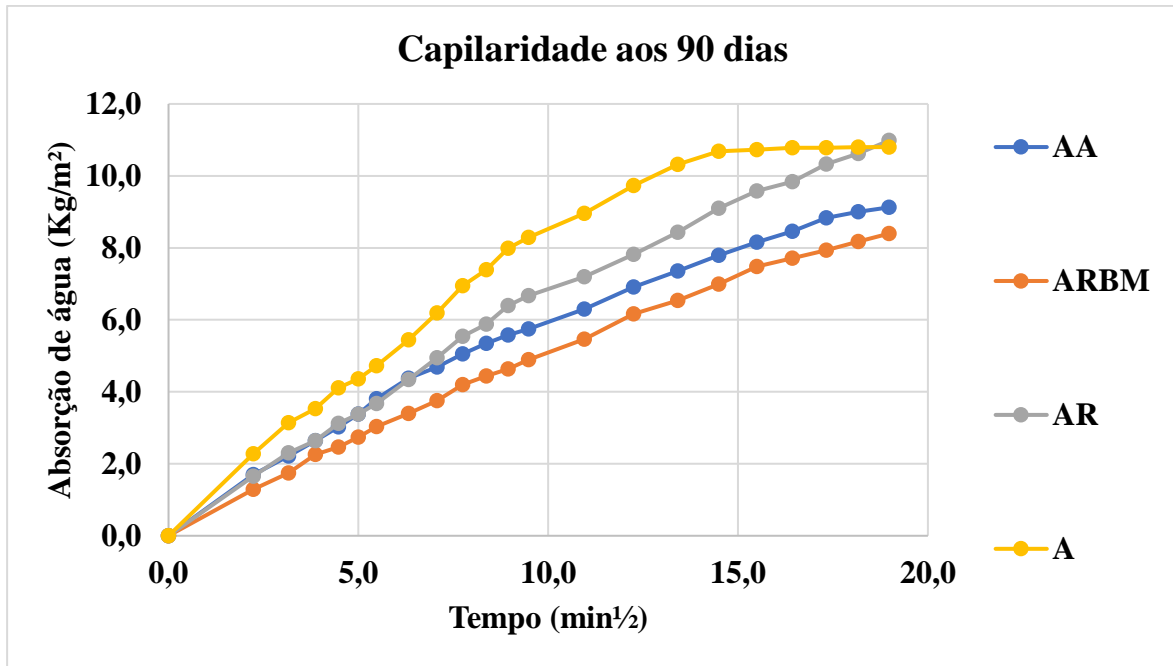


Figura 49 Resultados dos coeficientes de capilaridade das argamassas curadas a 90 dias

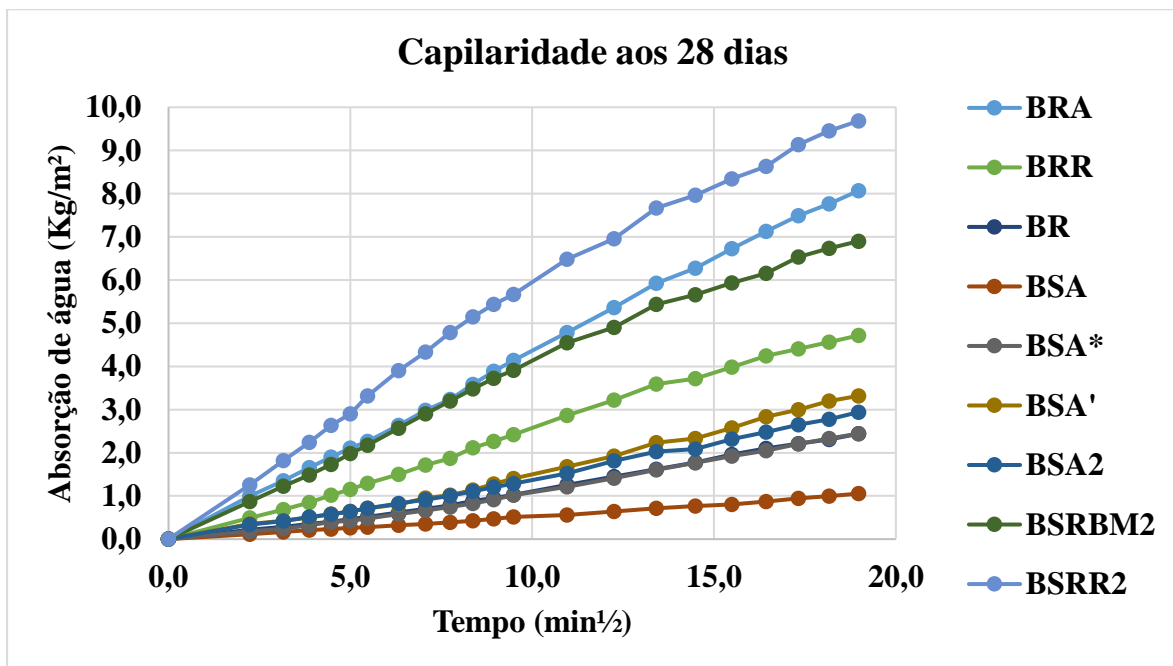


Figura 50 Resultados dos coeficientes de capilaridade das betonilhas curadas a 28 dias

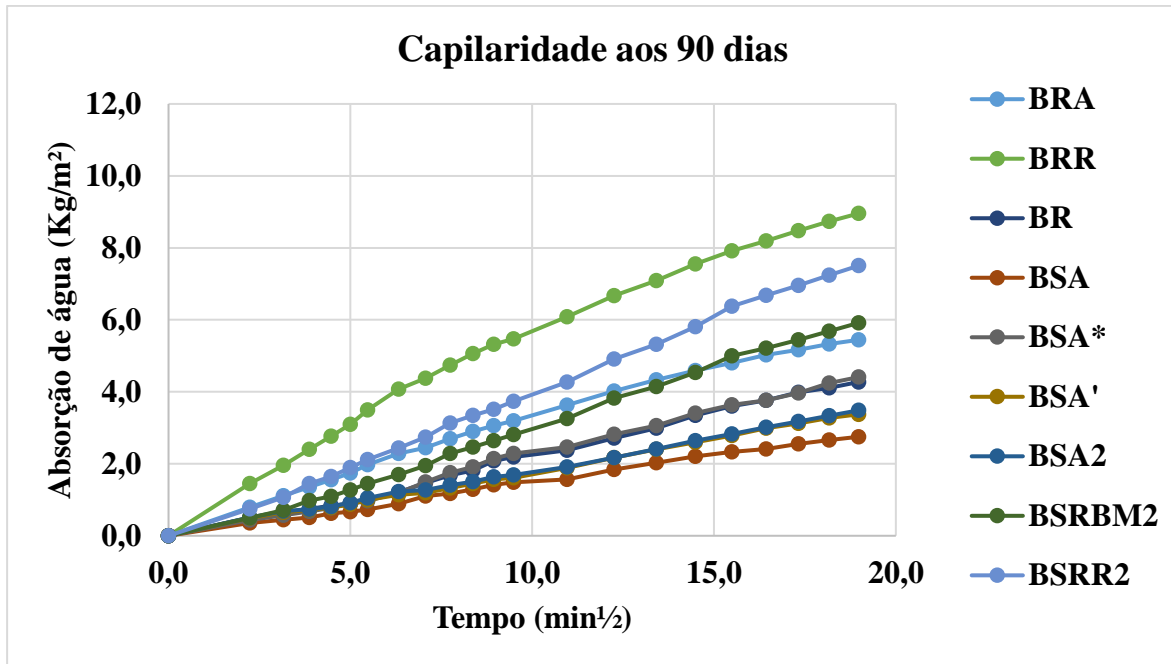


Figura 51 Resultados dos coeficientes de capilaridade das betonilhas curadas a 90 dias

A figura 52 apresenta as amostras após serem submetidas ao ensaio da capilaridade.



Figura 52 Amostras submetidas ao ensaio de capilaridade

Analisando os valores obtidos para as betonilhas (figuras 50 e 51), verifica-se que as amostras das betonilhas com resíduos (BRA), (BRR) do primeiro grupo de formulações são as que apresentam os maiores coeficientes de capilaridade aos 28 e 90 dias. Este grupo foi aquele cujo teor de cimento foi relativamente reduzido. Nas amostras das betonilhas dos grupos S1 e S2 foram os resíduos refratário e RCD britado (BSRR2) e (BSRBM2) que apresentaram maior absorção de água por capilaridade aos 28 dias e aos 90 dias. É de notar que foram precisamente estas amostras que necessitaram de maior teor de água por causa do ajuste da trabalhabilidade.

4.2.5 Avaliação da existência de eflorescências e criptoflorescências

Após os ensaios à capilaridade, colocaram-se as amostras na câmara climatizada com uma temperatura de 20°C e de humidade relativa de 65%. Cortaram-se as amostras de modo a obter cubos (figura 53) para avaliar melhor e de modo mais rápido a existência ou não de sais nas amostras.

Apenas um cubo-provete de cada amostra foi colocado em cada um dos recipientes, contendo o de solução de sulfato de zinco, o de solução de sulfato de sódio e o de água destilada. Foram colocadas todas as amostras na estufa até se atingir massa constante. Após este passo, iniciaram-se então os ensaios para a avaliação da existência de sais, onde para além da observação no tempo também se pesaram as amostras para verificar a evolução da sua perda de massa.



Figura 53 Amostras em cubos para ensaio à existência de sais

Nas figuras 54, 55 e 56 estão representadas as evoluções das amostras de argamassas e betonilhas imersas em solução de sulfato de sódio. A solução de sulfato de sódio inicialmente preparada, antes das amostras serem submetidas a esta experiência, apresentava um pH de 6,50 a uma temperatura de 29,1°C. As amostras foram então colocadas durante duas horas imersas nesta solução de sulfato de sódio e depois foram colocadas numa estufa a 70°C durante a noite. Esta experiência durou 5 dias, visto que algumas amostras começaram a perder grandes quantidades de massa, devido à solução de sulfato de sódio ser extremamente forte, ao ponto de degradar rapidamente as amostras.

Como se pode verificar através das figuras 54, 55 e 56, as argamassas foram as que mais sofreram devido à imersão em sulfato de sódio, uma vez que este é um sulfato bastante forte. A (AR) foi a argamassa que mais depressa se degradou, sendo a composição química do resíduo refratário maioritariamente constituída por MgO e CaO. Daí que o sulfato de sódio em contacto com estes dois reagentes resultou na degradação total da amostra. As outras argamassas também se foram degradando (figura 54), apesar das suas composições químicas serem diferentes.

No caso das betonilhas, a (BRR) também foi a amostra que se degradou parcialmente, pois também possuía resíduo refratário como seu agregado. O pH final da solução de sulfato de sódio foi de 9,15 a uma temperatura de 23,2°C. O contacto do sulfato de sódio com as amostras, fez com que se degradassem rapidamente e a dissolução das amostras, ou seja, a perda significativa de massa, resultou na alcalinização da solução de sulfato de sódio. Com o ataque do sulfato de sódio às amostras, não se visualiza qualquer aparecimento de sais, mas sim a sua degradação.



a) Amostras secas



b) Amostras imersas em sulfato de sódio



c) Argamassa com resíduo Refratário (AR) totalmente degradada por ter sido imersa em sulfato de sódio (amostra com círculo a vermelho)

Betonilha com resíduo Refratário (BRR) a degradar-se aos poucos devido à imersão em sulfato de sódio (amostra com círculo a azul)



d) Argamassa com resíduo Britado Mesclado e betonilhas com resíduo Refratário e resíduo Britado Mesclado (ARBM, BSRR2, BSRBM2), amostras imersas em sulfato de sódio



e) Argamassa com resíduo Britado Mesclado e betonilhas com resíduo Refratário e resíduo Britado Mesclado (ARBM, BSRR2, BSRBM2), amostras secas após imersão em sulfato de sódio

Figura 54 Resultado final das amostras após imersão em solução de sulfato de sódio

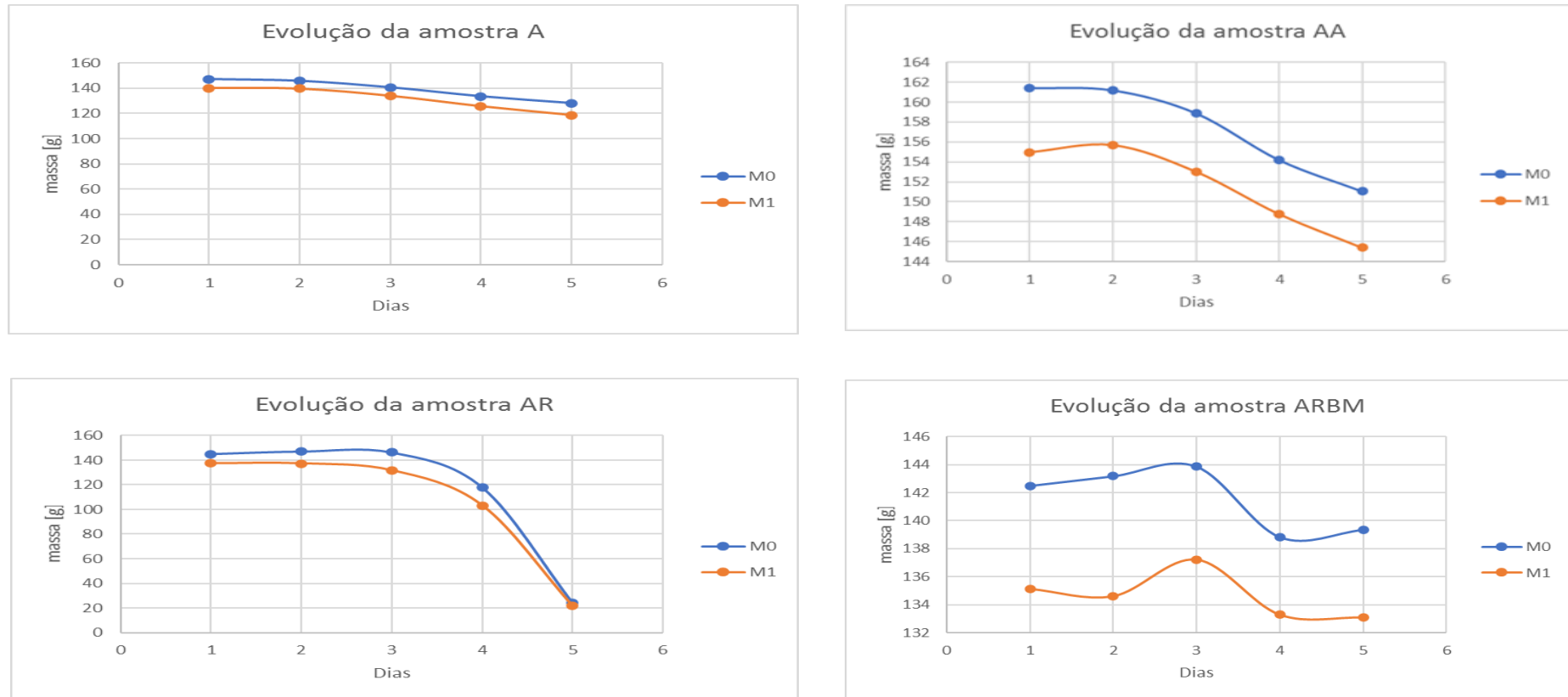


Figura 55 Evolução das amostras de argamassas imersas em solução de sulfato de sódio

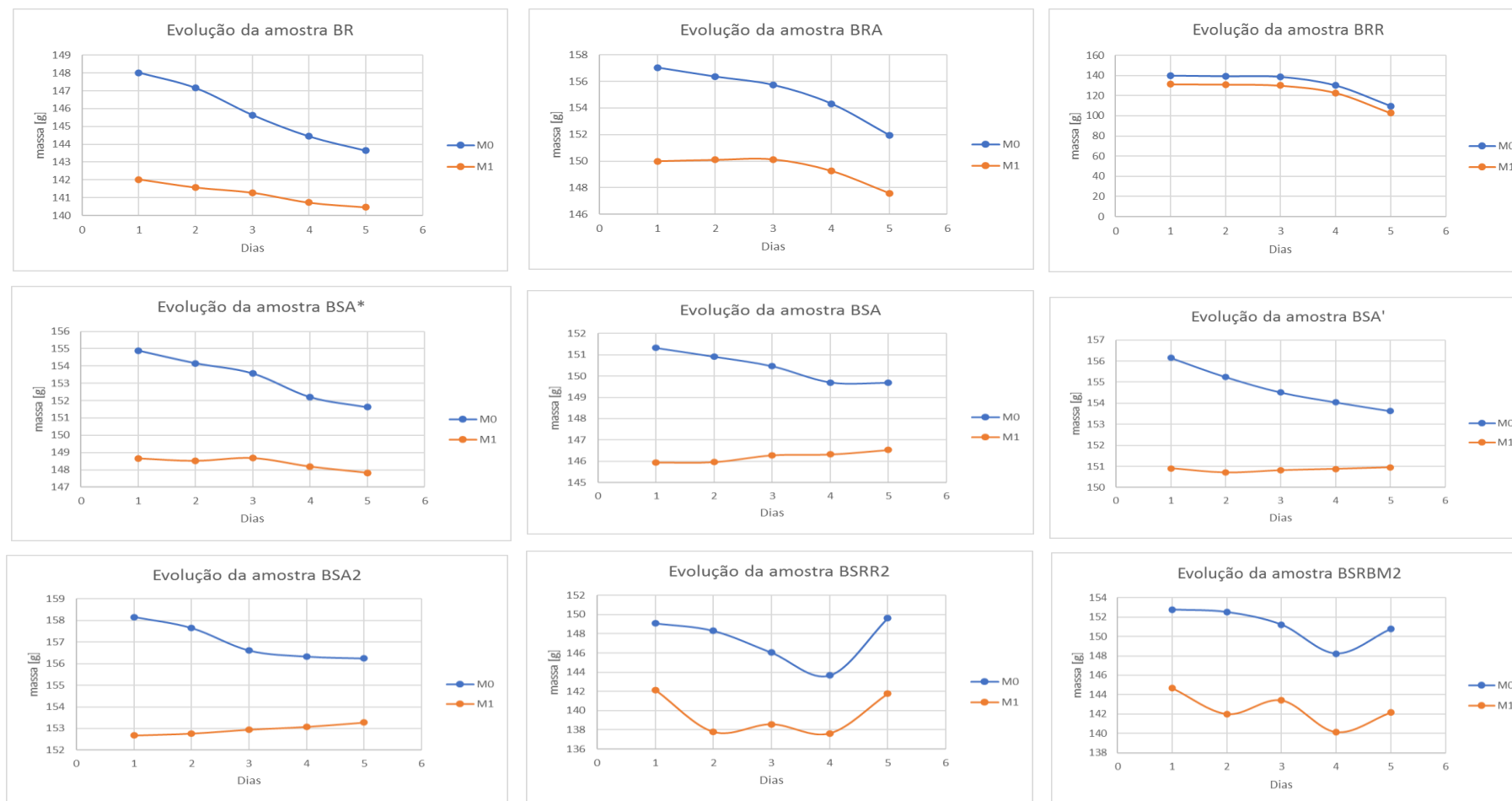


Figura 56 Evolução das amostras de betonilhas imersas em solução de sulfato de sódio

Nas figuras 57, 58 e 59 estão representadas as evoluções das amostras de argamassas e betonilhas imersas em solução de sulfato de zinco. A solução de sulfato de zinco inicialmente depois de preparada, antes das amostras serem submetidas a esta experiência, tinha um pH bastante ácido de 3,52 a uma temperatura de 26°C.

Foram colocadas as amostras durante 12 h imersas na solução de sulfato de zinco, e depois foram colocadas na câmara climatizada a uma temperatura de 22°C e humidade relativa de 55%. Esta experiência durou 50 ciclos (50 dias).

Como se pode verificar, as amostras em geral não sofreram grandes alterações, apenas perdas de massa, mas não significativas.

Também se observou alguma presença de sais de cor branca no fim dos 50 ciclos, devido a reação dos compostos químicos pertencentes aos resíduos presentes nas amostras que ao reagirem com o sulfato de sódio, criaram um depósito de cor branca à superfície e em volta das amostras. Também o contacto deste sulfato de sódio com as amostras e também aquando da presença das amostras na câmara climatizada originou uma película brilhante em todo o corpo de cada amostra.

O pH final da solução de sulfato de zinco foi de 5,10 a uma temperatura de 25°C, sendo que, com a imersão das amostras, estas foram perdendo massa acabando por alcalinizarem a solução de sulfato de zinco.



a) Amostras imersas em sulfato de zinco



b) Amostras secas após imersão em sulfato de zinco
(aparecimento de cor branca sobre algumas amostras)



c) Argamassa com resíduo Britado Mesclado e betonilhas com resíduo Refratário e resíduo Britado Mesclado (ARBM, BSRR2, BSRBM2), amostras imersas em sulfato de zinco



d) Argamassa com resíduo Britado Mesclado e betonilhas com resíduo Refratário e resíduo Britado Mesclado (ARBM, BSRR2, BSRBM2), amostras secas após imersão em sulfato de zinco

Figura 57 Resultado final das amostras após imersão em solução de sulfato de zinco

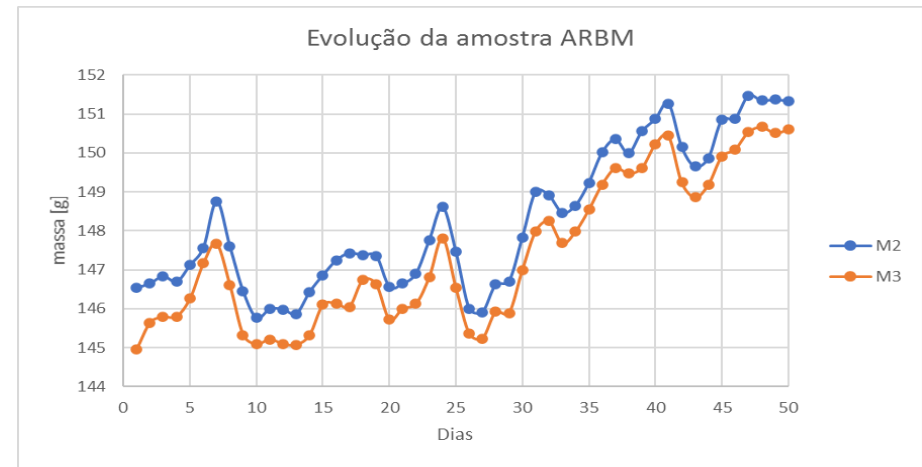
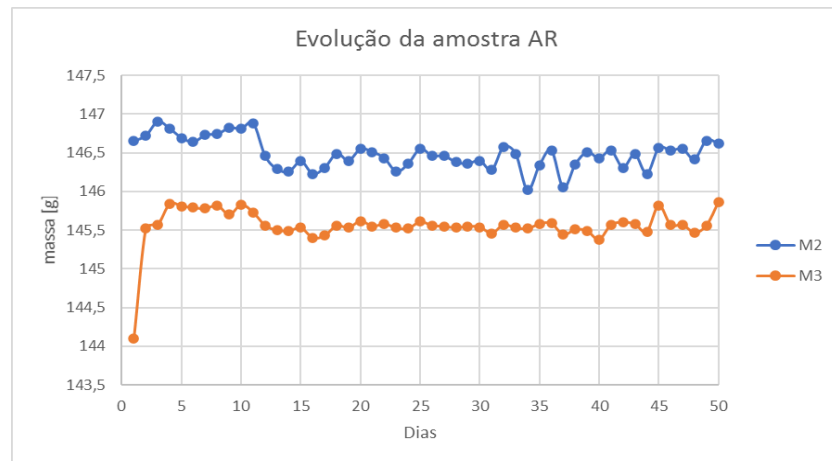
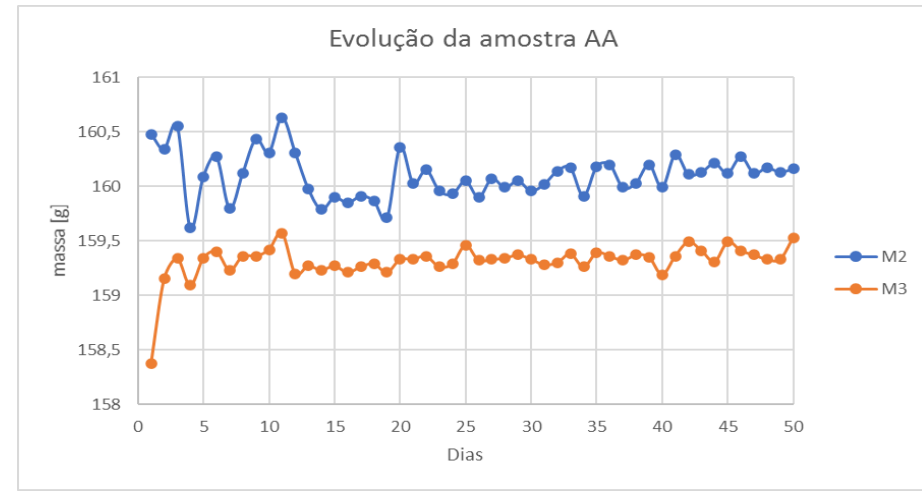
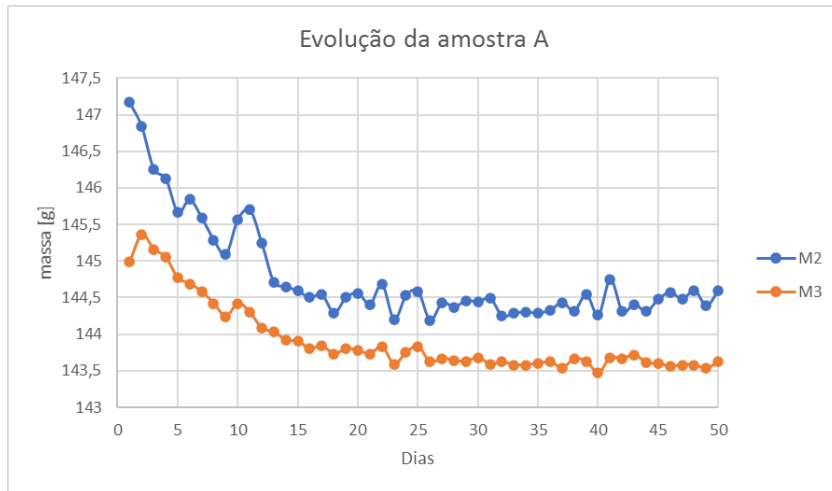


Figura 58 Evolução das amostras de argamassas imersas em solução de sulfato de zinco



Figura 59 Evolução das amostras de betonilhas imersas em solução de sulfato de zinco

Nas figuras 60 a 63 estão representadas as evoluções das amostras de argamassas e betonilhas imersas em solução de água destilada. A solução de água destilada preparada, antes das amostras serem submetidas a esta experiência, tinha um pH quase neutro de 6,5 a uma temperatura de 26°C.

Foram colocadas as amostras durante 12 h imersas na solução de água destilada, e depois foram colocadas na estufa a 80°C durante 12h. Esta experiência durou 30 ciclos (30 dias).

Como se pode verificar através das figuras 60 a 63, as amostras que sofreram algumas alterações, tais como fissuras foram a (AR) e a (BSRR2), pois estas duas amostras não suportaram as condições a que foram expostas. A amostra (AR) para além de fissuração, também acabou por se degradar acentuadamente. As amostras em geral não sofreram grandes alterações nesta situação de ataque, apenas alguma perda de massa, mas não significativa.

O pH final da solução de água destilada foi de 8,2 a uma temperatura de 22°C, sendo que com a imersão das amostras, elas foram perdendo massa acabando por alcalinizarem a solução de água destilada. Nestas amostras imersas em solução de água destilada não se verificou presença de sais, mas sim apenas alguma ligeira coloração de cor avermelhada devido ao ferro presente nas amostras.



a) Amostras imersas em água destilada



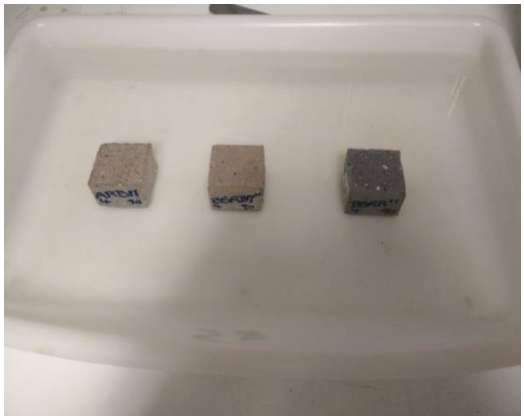
b) Amostras secas após imersão em água destilada



c) Argamassa com resíduo Refratário (AR) a deteriorar-se estando imersa em água destilada (círculo vermelho)



d) Argamassa com resíduo Refratário (AR) a fissurar, amostra seca após imersão em água destilada (círculo vermelho)



e) Argamassa com resíduo Britado Mesclado e betonilhas com resíduo Refratário e resíduo Britado Mesclado (ARBM, BSRR2, BSRBM2), amostras imersas em água destilada



f) Betonilha com resíduo Britado Mesclado (BSRBM2), amostra seca a fissurar

Figura 60 Resultado final da evolução das amostras após imersão em solução de água destilada

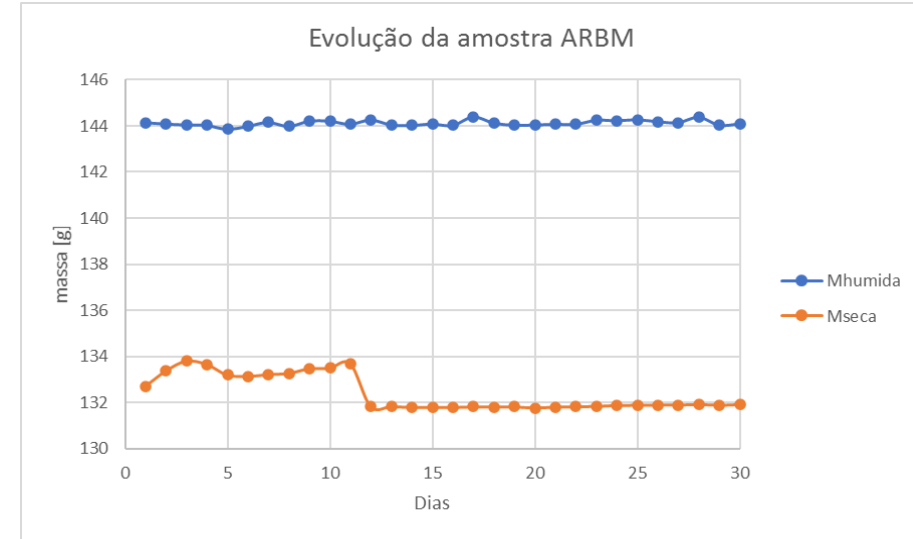
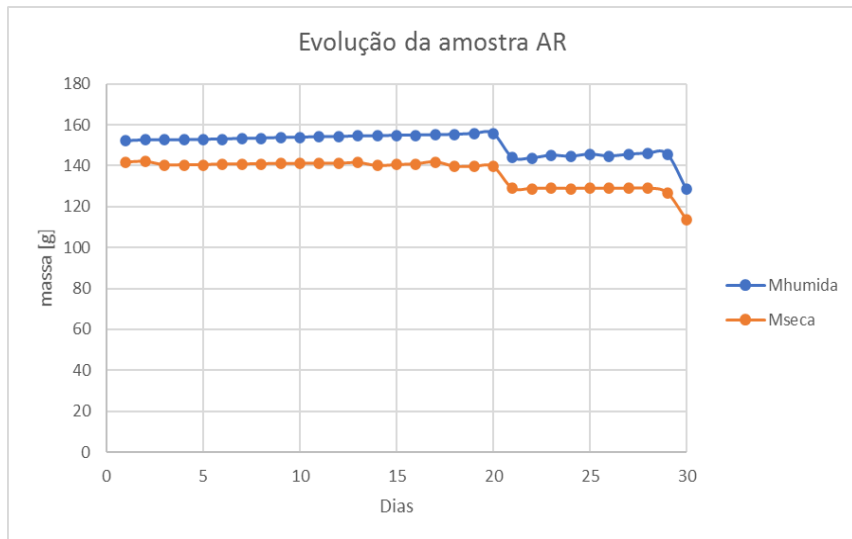
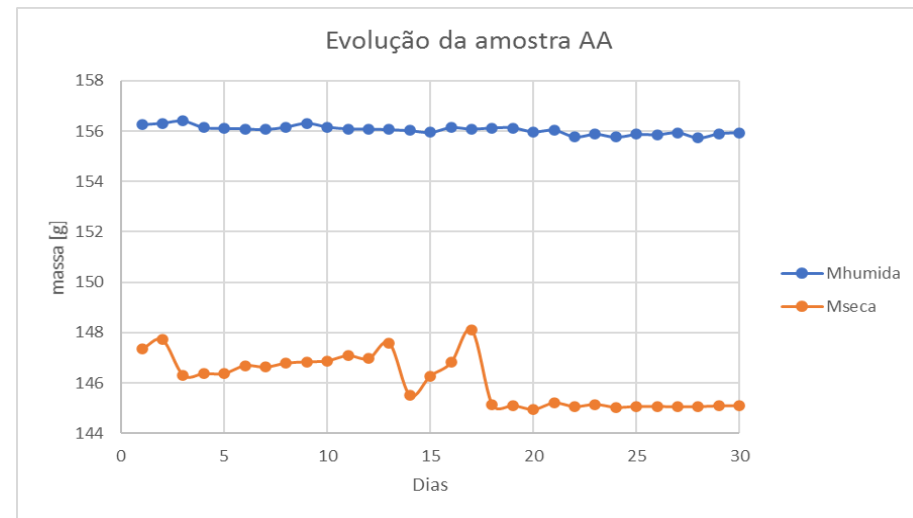
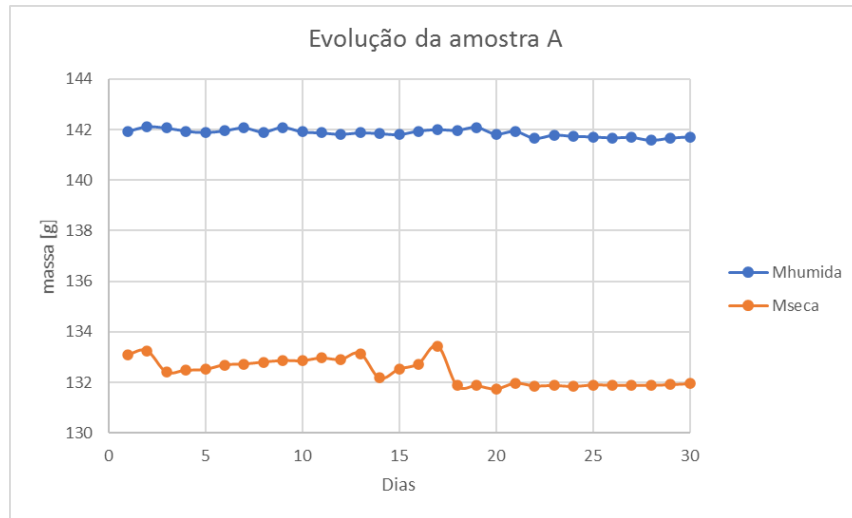


Figura 61 Evolução das amostras de argamassas imersas em solução de água destilada

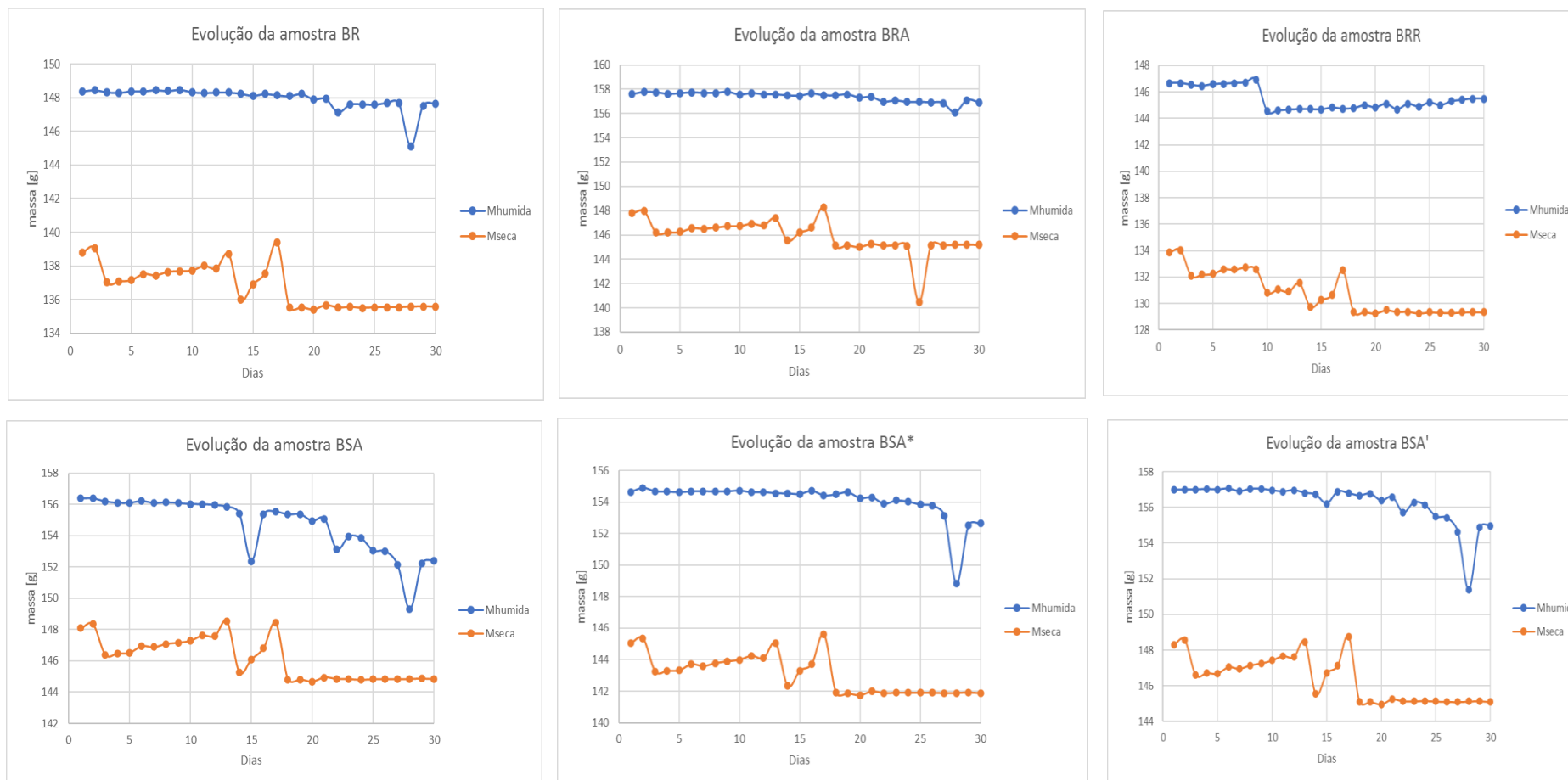


Figura 62 Evolução das amostras de betonilhas imersas em solução de água destilada

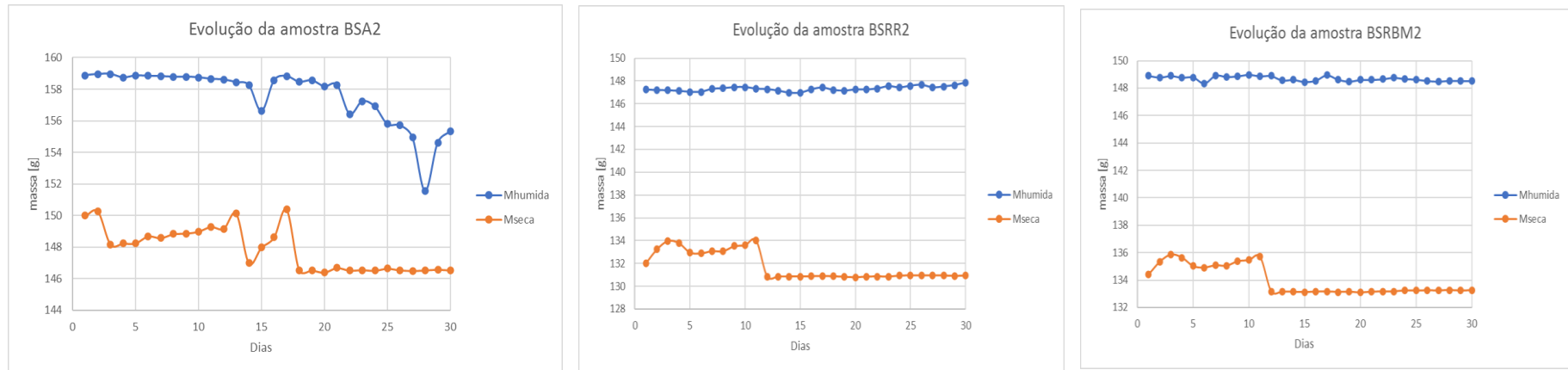


Figura 63 Evolução das amostras de betonilhas imersas em solução de água destilada (continuação)

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

A realização deste trabalho teve como objetivo estudar a substituição parcial da areia por resíduos como o resíduo ASIC, resíduo Refratário e RCD britado mesclado no sentido de, sendo possível essa substituição, sendo o desempenho equivalente ou melhorado em relação ao produto final, preservar os recursos naturais, gerando também assim uma contribuição do sector para uma economia circular e para a sustentabilidade da construção.

Por esse motivo, foram desenvolvidas quatro etapas na metodologia experimental, tais como:

1. Caracterização da matéria-prima e dos resíduos;
2. Elaboração e desenvolvimento de novas formulações de argamassas e betonilhas com substituição e adição dos resíduos nas formulações de argamassas e betonilhas;
3. Realização de ensaios laboratoriais para avaliação de propriedades relevantes dos materiais tais como a massa volúmica, módulo de elasticidade, resistência à flexão, resistência à compressão, absorção de água e eflorescências;
4. Avaliação da viabilidade do método desenvolvido.

Comprovou-se que os resíduos são potencialmente interessantes e que podem ser usados como agregados substituindo a areia nas composições originais.

Em relação à granulometria pode-se concluir que é facilmente ajustável a estas formulações e em relação à massa volúmica dos resíduos, que um dos resíduos (o resíduo ASIC) é o mais denso, com uma densidade de $3,50 \text{ g/cm}^3$, e por isso pode ser uma substituição interessante para as betonilhas mais condutoras do ponto de vista térmico ou então para as argamassas mais resistentes.

Relativamente às características dos produtos no estado endurecido, o resíduo ASIC é novamente o resíduo que mais se destaca pelo contributo para a condutibilidade térmica devido à sua densidade, apresentando valores superiores do que o valor da argamassa de referência, apresentando na betonilha também um valor elevado.

Passando às formulações em pasta, neste caso, resolveu-se ajustar o mesmo espalhamento para todas as formulações de argamassas e para todas as formulações de betonilhas no estado fresco, fazendo variar o teor de água. Neste ajuste verificou-se que tanto as argamassas como as betonilhas que possuam o resíduo ASIC não necessitam tanto de

água para obter a mesma trabalhabilidade que as amostras de referência. Os outros dois resíduos (Refratário e RCD Britado), necessitaram de mais água na mistura para garantir a mesma trabalhabilidade que as amostras de referência. Tudo verificado durante a amassadura.

Em relação à densidade e ao módulo de elasticidade, as amostras de argamassas e de betonilhas que possuem o resíduo ASIC na sua constituição, voltam novamente a obter valores elevados e superiores aos da referência, devido à maior densidade obtida nos produtos.

Em termos da resistência mecânica, as argamassas com resíduos refratário, RCD britado mesclado e resíduo ASIC, apresentam valores de resistência à flexão e à compressão superiores à argamassa de referência, sendo a argamassa com ASIC (AA) a com maiores valores de resistência. No caso das betonilhas foi necessário corrigir as formulações no que concerne à forma de adição dos resíduos, pois as betonilhas S1 e S2 continham poucos agregados ou nenhuns na sua composição, para obter nas betonilhas (BSA), (BSA') e (BSA2) as que apresentam valores superiores de resistência em relação à betonilha de referência. Assim, o resíduo ASIC tornou-se muito interessante quer para argamassas quer para betonilhas.

Em relação à absorção por capilaridade, a argamassa refratária (AR) apresenta um valor igual de absorção à de referência (A), sendo que as argamassas com RCD e ASIC apresentam valores inferiores de absorção ao padrão, sendo estes valores relativos ditados pela microestrutura capilar desenvolvida no processo de endurecimento (Coutinho & Gonçalves, 1994). Nas betonilhas verifica-se esta relação entre a porosidade capilar e os valores obtidos em relação ao valor da betonilha de referência, tendo-se conseguido obter várias formulações com valores inferiores.

Por fim, em relação à existência de eflorescências, o ataque de sulfato de sódio nas amostras, resultou na degradação das amostras com resíduo refratário e com o resíduo britado mesclado. Nas amostras com ASIC, estas foram perdendo massa ligeiramente e a presença de sais foi inexistente. O ataque de sulfato de zinco nas amostras resultou apenas em alguma perda de massa pouco significativa e, no final dos ciclos, foram aparecendo alguns sais de cor branca nas amostras. O ataque por água destilada nas amostras, revelou que as amostras com resíduo refratário foram também apresentando algumas fissuras. Nas

outras amostras não se notou nada em termos de presença de sais, apenas alguma cor vermelha contendo o resíduo ASIC eventualmente por causa do ferro na sua composição.

Em resumo, pode considerar-se o resíduo ASIC um resíduo muito interessante para o uso em argamassas e em betonilhas, visto que através dos ensaios laboratoriais foi-se verificando que os produtos com este resíduo em comparação com os produtos de referência conseguem apresentar valores positivos para as aplicações que se apontaram.

Tabela 13 Quadro-resumo dos ensaios laboratoriais

Composição	Percentagem de água (%)	Espalhamento (mm)	Condutibilidade térmica (w/m.K)	Densidade 28 dias (g/cm³)	Densidade 90 dias (g/cm³)	Coefficiente de capilaridade 28 dias (kg/m².min^{1/2})	Coefficiente de capilaridade 90 dias (kg/m².min^{1/2})
Argamassa de referência (A)	12.5	135	1.775	2.11	2.04	0.46	0.57
Argamassa com Resíduo Refratário (AR)	13.5	135	1.725	2.19	2.12	0.33	0.57
Argamassa com RCD Britado Mesclado (ARBM)	14	135	-	2.07	2.02	0.50	0.44
Argamassa com Resíduo ASIC (AA)	12.5	135	1.946	2.28	2.29	0.43	0.46
Betonilha de referência (BR)	14	200	1.622	2.13	2.11	0.14	0.24
Betonilha com Resíduo ASIC (BRA)	14	200	1.975	2.31	2.26	0.43	0.29
Betonilha com Resíduo Refratário (BRR)	16	200	1.169	2.04	2.03	0.26	0.46

Tabela 14 Quadro-resumo dos ensaios laboratoriais (continuação)

Composição	Percentagem de água (%)	Espalhamento (mm)	Condutibilidade térmica (w/m.K)	Densidade 28 dias (g/cm³)	Densidade 90 dias (g/cm³)	Coefficiente de capilaridade 28 dias (kg/m².min^{1/2})	Coefficiente de capilaridade 90 dias (kg/m².min^{1/2})
Betonilha S1 com Resíduo ASIC (BSA*)	14	280	-	2.23	2.2	0.14	0.24
Betonilha S1 com Resíduo ASIC (BSA)	12.5	200	-	2.29	2.22	0.05	0.15
Betonilha S1 com Resíduo ASIC (BSA')	12	200	-	2.31	2.32	0.18	0.18
Betonilha S2 com Resíduo ASIC (BSA2)	12.5	200	-	2.31	2.32	0.16	0.18
Betonilha S2 com Resíduo Refratário (BSRR2)	17.5	200	-	2.07	2	0.51	0.41
Betonilha S2 com Resíduo Britado Mesclado (RCD) (BSRBM2)	16	200	-	2.14	2.03	0.37	0.33

Tabela 15 Quadro-resumo dos ensaios laboratoriais – ensaios mecânicos

Composição	Módulo de Elasticidade 28 dias (MPa)	Módulo de Elasticidade 90 dias (MPa)	R. Flexão 28 dias (MPa)	R. Flexão 90 dias (MPa)	R. Compressão 28 dias (MPa)	R. Compressão 28 dias (MPa)
Argamassa de referência (A)	27.74	25.12	2.73	3.29	13.95	13.65
Argamassa com Resíduo Refratário (AR)	27.73	26.17	3.85	3.54	17.29	19.69
Argamassa com RCD Britado Mesclado (ARBM)	22.9	22.73	3.4	4.61	13.39	16.84
Argamassa com Resíduo ASIC (AA)	34.07	34.1	4.29	5.47	21.35	28.41
Betonilha de referência (BR)	27.42	27	4.93	6.94	20.66	26.63
Betonilha com Resíduo ASIC (BRA)	29.47	28.17	4.54	6.54	17.48	22.91
Betonilha com Resíduo Refratário (BRR)	18.23	16.57	2.5	3.81	9.47	13.68

Tabela 16 Quadro-resumo dos ensaios laboratoriais – ensaios mecânicos (continuação)

Composição	Módulo de Elasticidade 28 dias (MPa)	Módulo de Elasticidade 90 dias (MPa)	R. Flexão 28 dias (MPa)	R. Flexão 90 dias (MPa)	R. Compressão 28 dias (MPa)	R. Compressão 28 dias (MPa)
Betonilha S1 com Resíduo ASIC (BSA*)	26.91	29.68	4.51	6.51	17.93	23.86
Betonilha S1 com Resíduo ASIC (BSA)	26.13	27.58	4.73	7.46	20.04	26.99
Betonilha S1 com Resíduo ASIC (BSA')	28.44	28.73	4.6	6.95	20.01	28.46
Betonilha S2 com Resíduo ASIC (BSA2)	29.21	29.21	5.17	7.37	21.7	30.79
Betonilha S2 com Resíduo Refratário (BSRR2)	19.83	18.67	2.99	5.16	9.6	15.25
Betonilha S2 com Resíduo Britado Mesclado (RCD) (BSRBM2)	20.29	18.45	3.78	4.84	12.35	18.43

Tabela 17 Quadro-resumo dos ensaios laboratoriais – avaliação de eflorescências e criptoflorescências

Composição	Avaliação de eflorescências e criptoflorescências
Argamassa de referência (A)	Alguma degradação com sulfato de sódio
Argamassa com Resíduo Refratário (AR)	Em sulfato de sódio, a amostra ficou destruída. Em sulfato de zinco, alguma presença de cor branca na parte superior. Em água destilada, verifica-se a degradação da amostra.
Argamassa com RCD Britado Mesclado (ARBM)	Em sulfato de sódio, alguma degradação e aparecimento de cor branca.
Argamassa com Resíduo ASIC (AA)	Alguma degradação com sulfato de sódio.
Betonilha de referência (BR)	Verifica-se apenas perda de massa nas três soluções.
Betonilha com Resíduo ASIC (BRA)	Verifica-se apenas perda de massa nas três soluções
Betonilha com Resíduo Refratário (BRR)	Em sulfato de sódio, degrada-se aos poucos. Em sulfato de zinco, alguma presença de cor branca na parte superior. Em água destilada, apenas perda de massa.
Betonilha S1 com Resíduo ASIC (BSA*)	Verifica-se apenas perda de massa nas três soluções.
Betonilha S1 com Resíduo ASIC (BSA)	Verifica-se apenas perda de massa nas três soluções
Betonilha S1 com Resíduo ASIC (BSA')	Verifica-se apenas perda de massa nas três soluções
Betonilha S2 com Resíduo ASIC (BSA2)	Verifica-se apenas perda de massa nas três soluções
Betonilha S2 com Resíduo Refratário (BSRR2)	Em sulfato de sódio, alguma degradação e aparecimento de cor branca.
Betonilha S2 com Resíduo Britado Mesclado (RCD) (BSRBM2)	Em sulfato de sódio, alguma degradação e aparecimento de cor branca.

Em relação a **propostas para trabalho futuro**, valeria a pena continuar a ser estudadas as formulações de argamassas e betonilhas com o resíduo ASIC, e também experimentar a substituição total da areia pelo resíduo ASIC em argamassas para verificar se existirão ainda mais melhorias nas propriedades das argamassas. Seria interessante reformular também algumas composições com os outros dois resíduos no que concerne ao teor de água, de modo a melhorar também as suas propriedades e concluir se realmente poderão ser usados no setor da construção civil como argamassas e betonilhas.

Estudar a sustentabilidade económica verificando a viabilidade das novas formulações, e também estudar a influência na porosidade com a substituição parcial dos agregados pelos resíduos estudados.

6 Referências Bibliográficas

- Almeida, J. ., & Ferreira, F. (2016). *Medição de Condutibilidade Térmica*.
- Amponsah, N. Y., Lacarrière, B., & Corre, O. Le. (2012). Impact of building material recycle or reuse on selected energy ratios. “*Resources, Conservation & Recycling*,” 67, 9–17.
- APA. (2015). Políticas de Ambiente e Desenvolvimento Sustentável - Orientações comunitárias e nacionais. *Agência Portuguesa Do Ambiente*, 1–21.
- APFAC. (2020). *Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas e ETICS*. APFAC.
- Carvalheiras, J. A. de S. (2016). *ESTUDO DA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE FIBRAS DE VIDRO EM GEOPOLÍMEROS, ARGAMASSAS E TELAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO*. Universidade de Aveiro.
- CEN (Comité Européen de Normalisation). (1998a). *EN1015-2: Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*.
- CEN (Comité Européen de Normalisation). (1998b). *prEN1015-1: Methods of test for mortar for masonry - Part 1: Determination of particle size distribution (by sieve analysis)*.
- CEN (Comité Européen de Normalisation). (1998c). *prEN1015-3: Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*.
- CEN (Comité Européen de Normalisation). (1999). *prEN1015-11: Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*.
- CEN (Comité Européen de Normalisation). (2002). *EN1015-18: Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*.
- CEN (Comité Européen de Normalisation). (2003). *EN998-1: Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar*.
- CEN (Comité Européen de Normalisation). (2010). *En 998-2: Specification for mortar for masonry - Part 2: Masonry mortar Définitions*.

- CHEMICALS, V. (2017). Ficha de dados de segurança. In *Ficha de dados de segurança* (Issue 1).
- Conferência das Nações Unidas. (1972). Declaração da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano – 1972. *Declaração de Estocolmo*, 1–13.
- Correia, A. G., Roque, A. J., Mestre, S. F., Castro, F., Fortunato, E., & Santayana, Fernando Pardo de; Trigo, L. (2007). A Valorização de agregados siderúrgicos inertes reciclados em obras geotécnicas - Um Projecto Nacional. *Valorização de Resíduos*, 19–25.
- Correia, C. (2005). Caracterização de eflorescências, sua natureza e mecanismos de formação em fachadas revestidas com cerâmica e pedra natural. *Saint-Gobain Weber Cimenfix SA*, 1–13.
- Cotec Portugal. (2016). Economia Circular - Preservar, otimizar e assegurar recursos essenciais para o nosso futuro. In *Cotec Portugal - Somos Inovação* (pp. 1–52).
- Coutinho, A. de S., & Gonçalves, A. (1994). *Fabrico e Propriedades do Betão - Volume III* (Laboratório Nacional de Engenharia Civil (ed.); 2.^a Edição).
- El-Sayed, S. A. ., & Mostafa, M. E. . (2014). Pyrolysis characteristics and kinetic parameters determination of biomass fuel powders by differential thermal gravimetric analysis (TGA/DTG). *Energy Conversion and Management*, 85, 165–172.
- European Commission. (2017). *Eficiência de recursos na UE*. ENVIRONMENT.
- Fang, H., Smith, J. D., & Peaslee, K. D. (1999). Study of spent refractory waste recycling from metal manufacturers in Missouri. *Resources, Conservation and Recycling*, 25, 111–124.
- Gulbe, L. ., Vitina, I. ., & Setina, J. . (2017). The Influence of Cement on Properties of Lime Mortars. *Procedia Engineering*, 172, 325–332.
- HARSCO ENVIRONMENTAL. (2019). *ASIC - agregados artificiais - materiais avançados para um mundo sustentável*. HARSCO ENVIRONMENTAL.
- Huysmans, S. L., Latil, G., & Sievert, N. (2020). *EUROPEAN MORTAR INDUSTRY ORGANISATION*. EMO.

- Illston, J. M.; Domone, P. L. J. (2001). *Costruction Materials - Their nature and behaviour* (Spon Press (ed.); 3rd ed.).
- IPQ (Instituto Português da Qualidade). (2003). *NP EN 1097-6: Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água.*
- IPQ (Instituto Português da Qualidade). (1999). *NP EN 933-2:Ensaios para a determinação das características geométricas dos agregados - Parte 2: Determinação da distribuição granulométrica: Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas.*
- IPQ (Instituto Português da Qualidade). (2000). - *NP EN 933-1: Ensaios das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração.*
- ISO 13320. (2009). No Title. *Particle Size Analysis - Laser Diffraction Methods.*
- Leoneti;, A., Nirazawa;, A., & Oliveira, S. (2016). Proposta de índice de sustentabilidade como instrumento de autoavaliação para micro e pequenas empresas (MPEs). *REGE - Revista de Gestão, 23*, 349–361.
- Limbachiya; Dhir, Ravindra K.; C., M. (1999). *Utilizing ready-mixed concrete and mortar* (Thomas Telford (ed.)).
- Linhares, P. F. (2011). *Avaliação de ligantes minerais em argamassas-cola.* Universidade de Aveiro.
- Lopes, M. G. (2010). *RECICLAGEM DE ESCÓRIAS DE INCINERAÇÃO DE RSU COMO AGREGADOS PARA A CONSTRUÇÃO.* Universidade de Aveiro.
- Lucas, J. C. P. (2015). *Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos de resíduos de loiça sanitária - Reciclagem de agregados.* Técnico de Lisboa.
- M. A. O. T. (2011). Decreto-Lei n.º 73/2011 de 17 de Junho. *Diário Da República, 1.ª Série — N.º 116 — 17 de Junho de 2011, 1(Resíduos), 3251–3300.*
- MacArthur, E. (2017). *Conceito: O que é uma economia circular? Uma estrutura para uma economia que é restauradora e regenerativa por design.* Ellen Macarthur Foundation.

- Manuel dos Santos. (2013). *AreiaSalgueiro.pdf*.
- Matias, G. M. L. (2014). *Argamassas de reabilitação com resíduos de cerâmica*. Universidade de Coimbra.
- Maxim S., Mel'gunov, & Ayupov, A. B. . (2017). Direct method for evaluation of BET adsorbed monolayer capacity. *Microporous and Mesoporous Materials*, 243, 147–153.
- Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. (2008). Decreto-Lei n.º 46/2008 de 12 de Março. *Diário Da República*, 1.ª Série — N.º 51 — 12 de Março de 2008, 51(1.ª série), 1567–1574.
- Miranda, A., Marques, L., Cabral, C., Monteiro, E. B., & Roberto, P. (2013). Análise Do Módulo De Elasticidade Estático E Dinâmico Para Diferentes Dosagens De Concreto. *Anais Do 55º Congresso Brasileiro Do Concreto - CBC2013*, 1, 1–13.
- Morón, C., Ferrández, D., Saiz, P., & Yedra, E. (2019). Measuring system of capillary rising damp in cement mortars. *Measurement*, 135, 252–259.
- Nepomuceno, M. C. S. ., & Silva, P. D. . (2014). Experimental evaluation of cement mortars with phase change material incorporated via lightweight expanded clay aggregate. *Construction and Building Materials*, 63, 89–96.
- Ng, W. Y., & Chau, C. K. (2015). New life of the building materials- recycle, reuse and recovery. *Energy Procedia*, 75, 2884–2891.
- Oliveira, F. M. de. (2010). *Avaliação da Sustentabilidade da Construção – Estudo de caso*. Universidade de Aveiro.
- Paiva, H. M. da C. (2005). *Caracterização reológica de argamassas*. Universidade de Aveiro.
- Paulo, R. S. V. M. N. (2006). *Caracterização de Argamassas Industriais*. Universidade de Aveiro.
- Pinheiro, M. (2006). *Ambiente E Construção Sustentável - Manuel Duarte Pinheiro* (Fernandes & Terceiro (ed.); Instituto).
- Pinto, A. P. F., Gomes, A., & Pinto, J. B. (2006). Argamassas. *Materiais de Construção*, 1–32.

- Potting, J., Nierhoff, N., Francesca, M., Antikainen, R., Colgan, S., Hauser, A., Günther, J., Wuttke, J., Jørgensen Kjær, B., & Hanemaaijer, A. (2017). European Network of the Environment Protection Agencies (EPA Network) - Interest group on Green and Circular Economy. *EPA Network, May*, 1–25.
- Presidência do Conselho de Ministros. (2017). O Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal. *Diário Da República, 1.ª Série — N.º 236 — 11 de Dezembro de 2017, I*, 54–73.
- RCD- Resíduos de Construção e Demolição SA. (2014). *RCD- Resíduos de Construção e Demolição*. RCD- Resíduos de Construção e Demolição SA.
- República Portuguesa; Ambiente. (2020a). *A INICIATIVA ECO.NOMIA Um quadro estratégico regenerativo e mobilizador*. Eco.Nomia.
- República Portuguesa; Ambiente. (2020b). *ESTRATÉGIAS DA ECONOMIA CIRCULAR*. Eco.Nomia.
- Ricklefs, A., Thiele, A. M. ., Falzone, G., Sant, G., & Pilon, L. (2017). Thermal conductivity of cementitious composites containing microencapsulated phase change materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 104*, 71–82.
- Sadik, C., El Amrani, I. E., & Albizane, A. (2014). Recent advances in silica-alumina refractory: A review. *Journal of Asian Ceramic Societies, 2*, 83–96.
- Sako, E. Y. ., & Pandolfelli, V. C. . (2014). Review article - The corrosion and microstructure relationship: a key issue to develop high-performance spinel-containing refractory castables. *Cerâmica, 60*(353), 127–143.
- Sheet, S. D. (2019). *SIGMA-ALDRICH. 1907*, 1–7.
- Teodoro, N. F. G. T. (2011). *Contribuição para a Sustentabilidade na Construção Civil : Reciclagem e Reutilização de Materiais*. Universidade Técnica de Lisboa.
- Tuna, J. M. R. (2011). *Caracterização in-situ de eflorescências e de outros compostos salinos em paramentos*. Universidade Técnica de Lisboa.

Wu, H., Zuo, J., Zillante, G., Wang, J., & Yuan, H. (2019). Status quo and future directions of construction and demolition waste research: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 240, 1–13.